

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES NATURELLES

PAR

JEAN PIMIENTA

Première thèse :

LE CYCLE PLIOCÈNE-ACTUEL
DANS LES BASSINS PARALIQUES DE TUNIS

Deuxième thèse :

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Soutenues le 18 mai 1955 devant la commission d'examen.

MM. BARRABÉ... *Président.*

PRUVOST... } *Examineurs.*
RIVIÈRE... }

PARIS

AU SIÈGE DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DE FRANCE

28, RUE SERPENTE (VI^e)

1959

LE CYCLE PLIOCÈNE-ACTUEL
DANS LES BASSINS PARALIQUES DE TUNIS

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

PROFESSEURS

Doyen..... J. PÉRÈS.

G. JULIA..... T Analyse supérieure et Algèbre supérieure.
 E. DARMOIS..... T Enseignement de Physique.
 FOCH..... T Mécanique physique et expérimentale.
 PAUTHENIER..... T Électrotechnique générale.
 DE BROGLIE..... T Théories physiques.
 JOB..... T Chimie générale.
 PRENANT..... T Anatomie et Histologie comparées.
 GARNIER..... T Géométrie supérieure.
 PÉRÈS..... T Mécanique des fluides et applications.
 LAUGIER..... T Physiologie générale.
 M. CURIE..... T Physique (P. C. B.).
 BARRABÉ..... T Géologie structurale et Géologie appliquée.
 G. DARMOIS..... T Calcul des probabilités et Physique mathématique.
 J. BURCART..... T Géographie physique et Géologie dynamique.
 PLANTEFOL..... T Botanique.
 GRASSÉ..... T Évolution des êtres organisés.
 PRÉVOST..... T Chimie organique.
 BOULIGAND..... T Application de l'analyse à la Géométrie.
 CHAUDRON..... T Chimie appliquée.
 WYART..... T Minéralogie.
 TEISSIER..... T Zoologie.
 MANGENOT..... T Biologie végétale.
 P. AUGER..... T Physique quantique et relativité.
 MONNIER..... T Physiologie des fonctions.
 PIVETEAU..... T Géologie.
 ROCARD..... T Physique (E. N. S.).
 H. CARTAN..... T Mathématiques (E. N. S.).
 LAFFITTE..... T Chimie générale.
 FAVARD..... T Mécanique générale.
 COULOMB..... T Physique du Globe.
 M^{lle} COUSIN..... T Biologie animale (P. C. B.).
 CHRÉTIEN..... T Chimie minérale.
 P. DRACH..... T Zoologie.
 KASTLER..... T Physique.
 EPHRUSSI..... T Génétique.
 WURMSER..... T Biologie physico-chimique.
 RIVIÈRE..... T Géologie (S. P. C. N.).
 GAUTHERET..... T Biologie végétale (P. C. B.).
 LUCAS..... T Recherches physiques.
 A. THOMAS..... T Biologie cellulaire.
 ARNULF..... T Optique appliquée.
 M. MORAND..... T Physique.
 SOLEILLET..... T Physique.
 FORTIER..... T Mécanique expérimentale des fluides.
 DANJON..... T Astronomie.
 FROMAGEOT..... T Chimie biologique.
 LAPORTE..... T Physique générale et radioactivité.
 JANET..... T Mécanique analytique et Mécanique céleste.
 PETIT..... T Biologie maritime.
 QUENY..... T Météorologie et Dynamique atmosphérique.
 GALLIEN..... T Embryologie.
 EICHORN..... T Biologie végétale (P. C. B.).
 DE CUGNAC..... T Biologie végétale (P. C. B.).
 M^{lle} CAUCHOIS..... T Chimie physique.
 THELLIER..... T Physique du Globe.
 AUDUBERT..... T Electrochimie.
 L'HÉRITIER..... T Génétique.
 GRIVET..... T Radioélectricité.
 PONCIN..... T Mécanique des fluides.
 THIRY..... T Mécanique appliquée.
 DUBREIL..... T Arithmétique et théorie des nombres.
 QUELRT..... T Chimie organique.
 CAGNIARD..... T Géophysique appliquée.
 CHAMPETIER..... T Chimie macromoléculaire.

CUVILLIER..... T Géologie structurale et Géologie appliquée.
 JUNG..... T Pétrographie.
 TRILLAT..... T Microscopie et diffraction électronique.
 WIEMANN..... T Chimie organique structurale.
 JACQUINOT..... T Spectroscopie et Physique céleste.
 VASSY..... T Physique de l'atmosphère.
 DESTOUCHES..... T Théories physiques.
 M. PRUVOST..... T Géologie.
 AMIEL..... T Chimie (P. C. B.).
 HOCART..... T Minéralogie.
 J. P. MATHIEU..... T Physique (P. C. B.).
 COUTEAUX..... T Biologie animale (P. B. C.).
 MAY..... T Biologie animale (P. C. B.).
 CHOQUET..... T Calcul différentiel et intégral.
 FELDMANN..... T Biologie (P. C. B.).
 GUINIER..... T Physique (P. C. B.).
 JOST..... T Biologie (P. C. B.).
 FORTET..... T Calcul des probabilités.
 SCHWARTZ..... T Méthode mathématique de la Physique.
 CHOUARD..... T Physiologie végétale.
 MALAVARD..... T Aviation.
 BRELOT..... T Calcul différentiel.
 NORMANT..... T Chimie (P. C. B.).
 BENARD..... T Chimie (P. C. B.).
 BUVAT..... T Botanique (E. N. S.).
 DUGUE..... T Statistiques mathématiques.
 GELOSO..... T Chimie (S. P. C. N.).
 SOULAIRAC..... T Psychophysiologie.
 ULRICH..... T Physiologie végétale.
 MARÉCHAL..... T Optique théorique et appliquée.
 KIRRMANN..... T Théories chimiques.
 CHADEFAUD..... T Botanique.
 DESTRIAU..... T Physique (M. P. C.).
 M^{lle} LE BRETON..... T Physiologie générale.
 SALEM..... T Mathématiques générales.
 LELONG..... T Mathématiques générales.
 DEVILLERS..... T Anatomie et Histologie comparées.
 EHRESMANN..... T Topologie Algébrique.
 FRANÇON..... T Physique (M. P. C.).
 GLANGEAUD..... T Géographie physique et Géologie dynamique.
 GODEMENT..... T Mathématiques (M. P. C.).
 PISOT..... T Calcul des probabilités.
 ROCH (E.)..... T Géologie.
 SCHATZMANN..... T Astrophysique.
 THERMIER..... T Paléontologie stratigraphique.
 ZAMANSKY..... T Mathématiques générales.
 JOLIOT..... T Physique nucléaire et Radioactivité.
 LENNUIER..... T Physique (P. C. B.).
 RIZET..... T Génétique.
 ROUTHIER..... T Géologie appliquée.
 M^{me} TONNELAT..... T Théories physiques.
 DIXMIER..... T Mathématiques (M. P. C.).
 SOUCHAY..... T Chimie (P. C. B.).
 AIGRAIN..... T Physique (P. C. B.).
 BRUSSET..... T Chimie (P. C. B.).
 M. LÉVY..... T Physique théorique.
 LENORMANT..... T Physiologie.
 M^{me} CHAIX..... T Chimie biologique.
 M^{me} HUREL-PY..... T Biologie Végétale (P. C. B.).
 PIAUX..... T Chimie (P. C. B.).
 BRUN..... T Mécanique expérimentale des fluides.
 LEDERER..... T Chimie biologique.
 M^{me} DUBREIL-JACOTIN..... T Mathématiques.
 M^{me} LELONG-FERRAND..... T Mathématiques (E. N. S.).
 BELLAIR..... T Géologie (S. P. C. N.).
 COTTE..... T Physique (M. P. C.).
 DUBOIS (J. E.)..... T Chimie (M. P. C.).
 LAMOTTE..... T Zoologie.
 LE ROLLAND..... T Mécanique des fluides.
 MICHEL..... T Chimie (P. C. B.).

Secrétaire général..... CH. MONIER.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES NATURELLES

PAR

JEAN PIMIENTA

Première thèse :

LE CYCLE PLIOCÈNE-ACTUEL DANS LES BASSINS PARALIQUES DE TUNIS

Deuxième thèse :

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Soutenues le 18 mai 1955 devant la commission d'examen.

MM. BARRABÉ... *Président.*

PRUVOST... }
RIVIÈRE... } *Examineurs.*



PARIS

AU SIÈGE DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DE FRANCE

28, RUE SERPENTE (VI^e)

1959

LE CYCLE PLIOCÈNE-ACTUEL DANS LES BASSINS PARALIQUES DE TUNIS

AVANT-PROPOS

Je suis redevable à la Société géologique de France d'avoir bien voulu accepter dans ses *Mémoires* le texte de la thèse, que j'ai soutenue en 1955, et, comme la pétrographie sédimentaire a rapidement progressé ces dernières années, je crois nécessaire de préciser cette date.

Appelé à m'occuper de questions d'hydraulique souterraine au Service géologique de Tunisie, j'avais eu l'idée d'utiliser les données hydrologiques à éclaircir la formation des plaines alluviales, dont les sondages révélaient de mieux en mieux la puissance, et c'est pour développer cette idée que j'ai commencé une thèse. M. E. BERKALOFF, auquel je garde beaucoup de reconnaissance, a pu me conseiller utilement, et j'ai trouvé en outre des renseignements précis sur les points d'eau à son bureau de la Direction des travaux publics.

Je remercie M. H. NICOLAS, ingénieur en chef du Service des mines, qui m'a autorisé à accomplir un travail personnel. Je remercierai également ceux qui m'ont aidé à Tunis, à des titres divers. M. P. BELLAIR mettait à ma disposition l'appareil roetgenographique de l'Institut des hautes études de Tunis, un « Philips » Micrometallix. M. H. HELDT, le si aimable directeur de la Station océanographique de Salambô, me donnait la possibilité de circuler sur le lac de Tunis et m'ouvrait sa bibliothèque ; en même temps M^{me} H. HELDT m'enseignait la biologie de la lagune ¹. Le Dr E. GOBERT me faisait partager sa profonde connaissance du Quaternaire. Mes amis M. ARNOULD et S. ARNOULD-SAGET déterminaient une partie de mes faunes, et Cl. COLLET me communiquait les résultats de ses travaux sur l'aménagement de la Medjerda, MM. H. WELS et J. TIXERONT me prêtaient leur documentation. M. SAUMAGNE m'expliquait l'archéologie tunisoise. M. Y. JOUIN m'ouvrait les laboratoires du Service des mines de Tunisie, M. L. BALOZET me recevait à l'Institut Pasteur de Tunis dont il était directeur, M. P. PRECIOSI à la station de l'O. N. M. d'El Aouina, M. E. DUMON au S. E. R. E. P. T. (Syndicat d'études et de recherches pétrolifères en Tunisie).

J'ai pu poursuivre ma thèse et la diriger plus nettement vers la pétrographie sédimentaire, grâce au professeur A. RIVIÈRE qui m'a accueilli à son laboratoire de Géologie du S. P. C. N. à Paris. Orientant mes recherches en des voies nouvelles et m'aidant ensuite à la rédaction, il a été pour moi un Directeur scientifique auquel je suis heureux d'exprimer ma profonde reconnaissance. C'est en particulier en me préparant à l'étude des phénomènes littoraux et fluviaux, qu'il m'a permis d'arriver à comprendre le rôle essentiel joué par les alluvions de la Medjerda dans la géologie des périodes récentes près de Tunis, et de donner enfin à l'exposé de mes travaux leur plan définitif. Je suis redevable à M^{lle} S. VERNHET de m'avoir appris la routine des analyses physiques et chimiques.

1. Cette phrase avait été écrite en 1955. M. Heldt a disparu depuis lors, laissant un excellent souvenir à tous ceux qui l'ont connu.

Mes remerciements les plus cordiaux vont aussi à M. le professeur L. LUTAUD qui a pris connaissance de mes premiers résultats et m'a encouragé à poursuivre, ainsi qu'à M. J. ROGER qui a déterminé pour moi une abondante faune pliocène, m'a donné des conseils concernant la biologie et auquel je dois d'avoir pu utiliser la documentation du C. E. D. P. (Centre d'études et de documentation paléontologiques). Je désire enfin témoigner ma gratitude à MM. les professeurs L. BARRABÉ et P. PRUVOST, que j'ai eu la chance d'avoir comme examinateurs.

INTRODUCTION

I. Les bassins paraliques de la région de Tunis.

Sommaire. — Cadre orographique et différenciations alluviales. Déplacement de la Medjerda de Tunis (la Manouba) à Utique.

Le sujet du présent travail est l'étude de l'histoire sédimentaire du delta de la Medjerda, mais si l'auteur a dû nécessairement faire une monographie régionale, il s'est essentiellement attaché à la découverte de lois générales.

Le delta remplit actuellement un bassin paralique dans la partie occidentale du golfe de Tunis. Dénuées de moyens, les recherches se sont arrêtées au littoral. Il sera d'ailleurs établi que l'apport fluviatile ne fait plus guère progresser celui-ci. En ce qui concerne les durées, le régime deltaïque ne semble pas s'être interrompu depuis la transgression pliocène. L'étude complète du cadre orographique entraînerait très en amont, car les plateaux alluviaux se succèdent sans solution de continuité au long de l'Atlas tunisien. Quelques « horst » circonscrivent incomplètement une baie triangulaire, compliquée d'extrusions médianes (Pl. IV).

L'auteur a disposé des travaux de ses prédécesseurs : cartes au 200 000^e de M. Solignac, feuilles Bizerte et Tunis ; au 50 000^e, feuille Porto Farina de Burollet et Berthe ; étude géologique des bassins mio-pliocènes de la Tunisie de P. F. Burollet [1951]. Il a également accédé aux archives de la Direction des travaux publics de Tunisie et du S. E. R. E. P. T. (Société d'études et de recherches pétrolifères en Tunisie), qui conservent des travaux inédits fouillés au 50 000^e et au 20 000^e. Il convient de rendre hommage par ordre alphabétique à MM. Tahar Amira pour la région de Mateur, J. Archambault et E. Dumon pour les écaïlles de Tunis, E. Berkaloff pour le Djebel Naheli, X. des Ligneris au N de Porto Farina et à Tunis, P. Planchon pour le Djebel Naheli au 20 000^e. En fait, les recherches sans antériorités autre que l'ancienne carte au 200 000^e se réduisent presque au relief allongé au N de la Medjerda jusqu'à Mateur. Dans l'ensemble de ce domaine je me suis contenté de préciser des contours, en n'ayant que peu d'attributions stratigraphiques à réviser. Aussi la carte géologique, claire par elle-même, ne sera-t-elle pas com-
mentée.

Quelques variations de faciès la compliquent cependant. C'est ainsi que le Crétacé s'achève par un épisode calcaire massif, campanien selon M. Solignac, qui pourrait être maestrichtien d'après les recherches récentes du S. E. R. E. P. T., et qui disparaît dans la région de Tunis, remplacé par un Maestrichtien à Échinides et à grands Inocérames ; son extension reste encore à préciser. Il peut être confondu avec le calcaire lutétien parfois pauvre en Nummulites, ou réciproquement, comme il est arrivé encore assez souvent. Les marnes dano-montiennes ou « suessonniennes » disparaissent également dans la région de Tunis. Cette double lacune caractérise ce que l'on peut appeler le faciès *tunisois* [Solignac, 1927]. Réunissant flysch et marnes gypseuses, le Miocène littoral est très varié et suppose une existence prépliocène du régime deltaïque et lagunaire. Celui du Kechabta présente même un épisode salifère parfois confondu avec du

Trias. Dans les environs de Tunis, un Flysch à débris animaux rarissimes et non identifiables est considéré comme miocène.

Les auteurs attribuent certaines collines au Pliocène continental ou au Pontien, mais ne peuvent les distinguer des « alluvions » de la plaine que par leur altitude ; nous avons été amenés à en faire du « Mio-Quaternaire fluviatile ». C'est en nous orientant dans les voies nouvelles, que nous avons essayé de perfectionner une aussi fruste stratigraphie.

Si le plateau alluvial confère une physionomie spécifique à l'Atlas tunisien en isolant les unités, son développement côtier septentrional et oriental devient l'élément structural essentiel et le bas delta est très caractéristique à cet égard. Le contraste est frappant entre l'importance de cette plaine récente, comparée à la superficie médiocre des « horst ». Elle ne peut être représentée

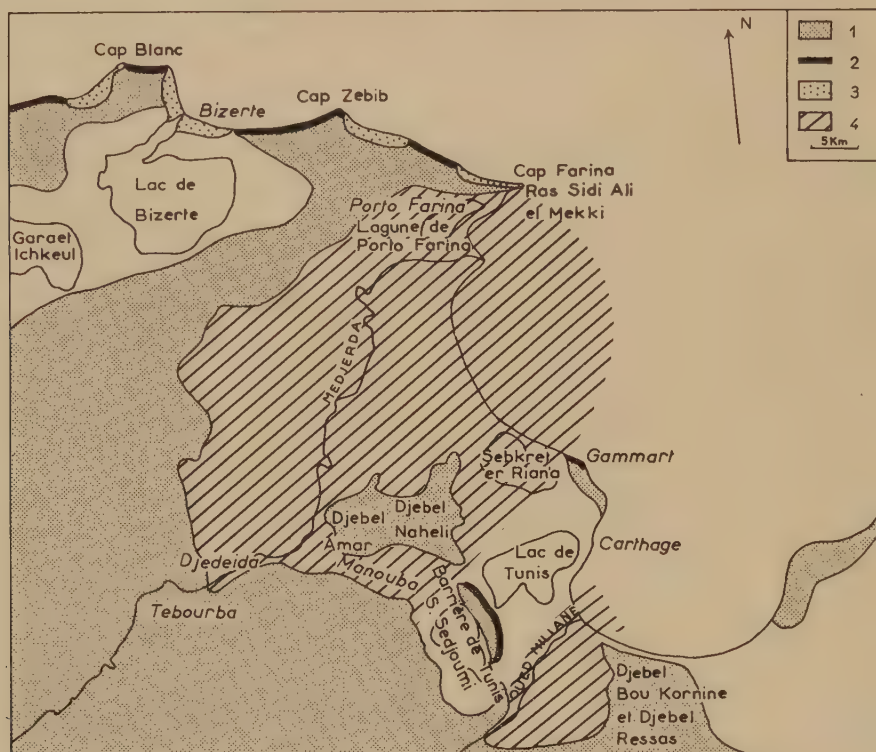


FIG. 1. — Domaine des cycles deltaïques et des rivages stabilisés au Quaternaire.

1 : bordure orographique ; 2 : plage tyrrhénienne soulevée à des altitudes variables ; 3 : dune ou plage actuelle ; 4 : cycles deltaïques.

sur la carte autrement que par une teinte uniforme et laisse persister un espace vierge démesuré au milieu des travaux les plus approfondis. Cette lacune appelait une nouvelle étude.

Les différenciations visibles sans recherches sédimentologiques seront vite décrites. Des éboulis enveloppent la base des « horst ». Le caractère palustre croît vers le rivage avec la diminution de l'altitude. Les limons, parfois stabilisés par un encroûtement calcaire, passent latéralement aux vases mouvantes de la slikke et du schorre. Le littoral sans relief est indécis ; des promontoires s'avancent, la mer pousse parfois des offensives submergeant les basses terres, des cordons littoraux s'élaborent en isolant des lagunes : Porto Farina, Sebkret el Bounta, Sebkret er Riana, cette dernière séparée du lac de Tunis par l'isthme de l'Ariana. Les plages de sables étendues entre les domaines vaseux internes et côtiers ont peu d'extension et peu d'épaisseur ; elle sont à éléments fins avec la faune habituelle. Au-delà des dernières pentes, la terre est plate, parsemée de dépres-

sions marécageuses et d'étangs souvent marqués de bouquets de palmiers. L'horizon y est sans limites, le littoral imprécis, et ne s'accompagnant d'aucun relief, est invisible. Les mirages de l'été y font naître des lacs évanescents au milieu desquels s'exhaussent sans mesures les rares touffes de jujubier ou la tache blanche d'un gourbi. Par gros temps, la barrière tourmentée des houles, visible à des kilomètres de distance, paraît surplomber la platitude géométrique des terres basses.

Quelques dunes accusent la direction dominante septentrionale des vents. La plus importante d'entre elle, à l'E de Bizerte, a été fixée grâce à une plantation de résineux effectuée par les soins des Eaux et Forêts. Vers l'intérieur, elle donne naissance à des sources captées pour l'alimentation de Bizerte. Deux autres dunes recouvrent les versants nord des promontoires pliocènes du cap Farina et de Gammart et une très petite est plaquée sur les grès oligocènes de Mégrine plus abrités, au S de Tunis. Des dunes fossiles, grès à stratifications entrecroisées avec rares Pulmonés, sont développées au N de Bizerte, et au N de Porto-Farina sous la dune actuelle. Carthage est bâti sur une dune fossile : c'est la « panchina » décrite par M. Solignac [1927]. La correspondance des dunes anciennes et nouvelles paraît impliquer une longue pérennité du régime éolien actuel.

Une plage ancienne conservée sur les rivages stables précise le domaine des cycles deltaïques quaternaires, caractérisés par leurs rapides séquences marines et continentales liées à la subsidence (fig. 1).

A Bizerte, E. Gruet [1951] la prétend tyrrhénienne et a trouvé quelques silex considérés comme moustériens, ce qui permet de supposer une équivalence Tyrrhénien-Moustérien, déjà indiquée en Tunisie orientale par E. Gobert [1948] ; alors qu'on admet plus généralement une équivalence Tyrrhénien-Acheuléen. J'ai récolté une faune à l'E de Bizerte, sur la côte du Rmel, à un endroit remarquable pour sa tectonique quaternaire et J. Roger y a déterminé :

<i>Glycymeris violascens</i> (Lmk)	<i>Cerithium rupestre</i> Risso
<i>Cardium tuberculatum</i> L. (var. <i>mutica</i> B. D. D.)	<i>C. vulgatum</i> Brug.
<i>Mactra subtruncata</i> Risso (var. <i>triangula</i> B. D. D.)	<i>Purpura haemastoma</i> (L.)
<i>Natica josephina</i> Risso (var. <i>caelata</i> B. D. D.)	<i>Conus mediterraneus</i> Brug.
<i>N. catena</i> (DA COSTA)	<i>Cancellaria cancellata</i> (L.)
<i>Patella caerulea</i> (L.) Phil.	

Pour J. Roger, toutes ces espèces sont actuelles. Le *Cerithium vulgatum* seul présenterait peut-être quelques déviations. La faune est donc récente et aucune association faunistique ne permet de définir paléontologiquement un Tyrrhénien. Le terme « Tyrrhénien » restera employé sans signification paléontologique dans cet ouvrage, parce qu'il désigne commodément cette récurrence transgressive du Quaternaire récent, qui interrompt pour un moment la régression du cycle pliocène si accentuée au Villafranchien. Les plages exhaussées par des plissements tectoniques très locaux, ne peuvent être synchronisées que dans la mesure où cette transgression est générale.

En pleine ville de Tunis, sur la colline de Mio-Quaternaire fluviale de la Kasba, un sondage profond de 20 m, destiné à reconnaître des fondations en face du 23 de l'av. Bab Djedid, a découvert un Quaternaire marin à *Cardium edule* et *Cerithium vulgatum*. La coupe suivante est simplifiée d'après M. Arnould [1948] :

— 0 à 7,50 m : remblai et argile rouge continentale	= 7,50 m
— 7,50 à 10,50 : calcaire coquillier, argile et sable jaune	= 3
— 10,50 à 21 : Pliocène continental	= 10,50
Le calcaire coquillier commence à 10 m d'altitude.	

Dans sa monotonie apparente la région décrite est remarquable parce que les « horst » médians, et particulièrement la « Barrière de Tunis », délimitent à la Manouba un bassin « endoréique »

dont l'ombilic est la Sebkra Sedjoumi. Rappelons que dans la terminologie d'E. de Martonne [1948] les régions endoréiques sont celles où les eaux de ruissellement s'écoulent vers l'intérieur, par opposition aux régions exoréiques où elles peuvent s'écouler en dehors ; les régions privées de ruissellement sont dites aréiques. Il n'est pas exceptionnel en Afrique du Nord de trouver des bassins endoréiques aussi voisins du littoral ; celui d'Oran est isolé par des collines côtières, dont l'aspect tectonique sera évoqué dans le chap. V [Gourinard, 1952] ; ceux de Tunisie orientale se sont différenciés en cours de régression, en partie parce que le débit solide des oueds est tellement massif qu'il finit par leur barrer l'accès à la mer. Dans la toponymie arabe, les ombilics sont baptisés sebkra (ou chotts), et il en est de même par extension des lagunes marines : Sebkret el Bounta, Sebkret er Riana (du nom d'espèces végétales de leur rivage), Sebkret el Behar (la sebkra de la mer ou lac de Tunis). En limitant l'emploi de ces termes aux terres endoréiques si développées dans le Moghreb, nous leur conférerons une valeur générique plus précise.

Le delta présente ainsi des conditions sédimentaires diversifiées. Avec l'étude des conflits entre la terre et la mer qui se déroulent à l'embouchure de la Medjerda, je m'efforce d'abord de préciser les actions deltaïques littorales accompagnant une subsidence cyclothématique. Profitant de ce que le bassin de la Manouba-Sedjoumi est très bien exploré parce que territoire suburbain d'une agglomération active, je me suis ensuite consacré à l'étude du régime endoréique et d'une manière plus générale à celle des remaniements liés à l'écoulement des eaux souterraines. De même la lagune de Tunis m'a permis d'étudier l'évolution du milieu lagunaire. Pour achever une synthèse, j'ai ensuite reconsidéré l'ensemble de la région décrite, où les aires sont successivement affectées par une subsidence paralique synorogénique.

*
* *

Le système palustre de Tunis développé à l'abri du Djebel Amar et du Djebel Naheli ne se rattache pas immédiatement à la Medjerda. En fait, les divagations de celle-ci sont plus importantes qu'il ne semblerait au premier abord et, pour des raisons de clarté, je commencerai cet exposé en tenant compte d'emblée de déplacements d'embouchures, hypothèse dont la réalité ne s'est imposée que peu à peu au cours de longues années de recherches.

La sédimentation tunisoise est, à première vue, énigmatique : des sondages ont, en effet, montré que sous un couvert palustre peu caractéristique, le bassin de la Manouba est rempli d'alluvions fluviales sur une épaisseur supérieure à 600 m, sans qu'il y ait de cours d'eau susceptibles de les avoir apportées, et les flèches sableuses isolant la lagune de Tunis se sont avancées dans le golfe malgré l'absence apparente d'apports locaux. Enfin, la lagune elle-même, avec au rivage une épaisseur de 360 m de matériel allogène d'aspect fluvial, n'est pas sans évoquer un ancien estuaire. En fait, il existe une vallée de Tunis, actuellement privée de fleuve, et un nivellement au 5 000^e a permis d'en établir le profil : la pente à peu près nulle à l'embouchure passe à 6,5 ‰ entre les collines rapprochées du Belvédère et de la Kasbah, puis diminue sur le plateau de la Manouba favorable aux méandres. Les fig. 2 et 3 donnent un plan coté et un profil schématique de cette vallée.

La topographie actuelle est peu favorable à l'idée du passage de la Medjerda dans le défilé entre les collines, car la vallée paraît s'ouvrir au S et la conduirait ainsi vers l'Oued Miliane. Mais le cirque éocène visible sur les parois nord et sud se forme sous la Sebkra Sedjoumi et, comme le montre un sondage, forme une barrière qui interrompt la sédimentation fluviale liée à la subsidence. La brèche apparente actuelle est superficielle et sera reconsidérée avec la tectonique. Au lieu dit Oued Lil, un seuil haut de 20 m barre la vallée et la sépare du bassin de la Medjerda. La rive droite y est formée de Plio-Quaternaire continental à pendage aval. Un banc sablo-gré-

seux supporte une strate argileuse inclinée à 20° , qui semble avoir favorisé un glissement dont il subsiste des témoins probants : loupes de terrain, fragments provenant du sommet emballés dans la pente ; la cicatrice du décollement est elle-même visible. Il en reste un paquet d'argile compacte, creusé d'une mare et formant verrou. La coupe est donnée fig. 3. S'il ne peut être tenu pour absolument certain que le glissement a suffi à fermer la vallée, cela semble cependant pro-

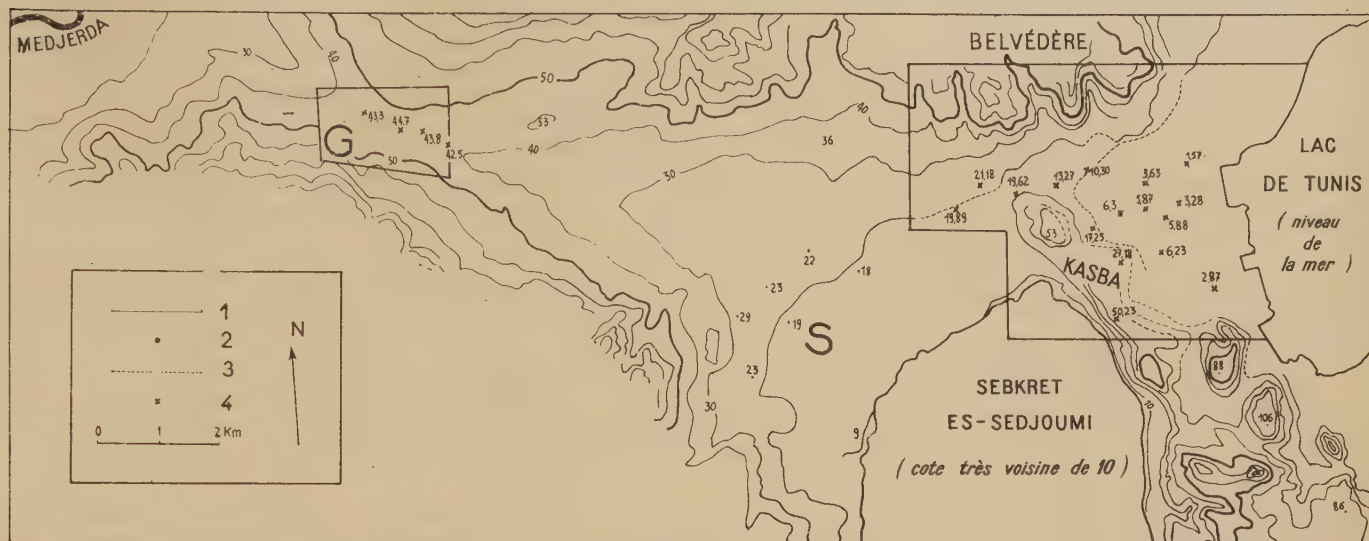


FIG. 2. — Ancienne vallée de Tunis.

1 et 2 : courbes de niveaux et cotes de la carte au 50 000^e, feuille de Tunis (régions encadrées complétées avec le plan directeur au 5 000^e des environs de Tunis) ; 3 et 4 : courbes de niveau et cotes du plan directeur ; G : glissement d'argile d'Oued Lil ayant barré la vallée et causé le détournement de la Medjerda vers Utique ; S : subsidence postérieure au détournement de la Medjerda, et non compensée par conséquent par ses alluvions.

bable et l'existence d'une ancienne Medjerda passant par Tunis, puis détournée par ce barrage, est la seule hypothèse conduisant par ailleurs à une interprétation spatiale et chronologique satisfaisante de la morphologie actuelle de l'ensemble du delta. A la suite de l'éboulement, le fleuve se serait frayé son nouveau lit à travers un synclinal de Pliocène marin éloigné d'une quarantaine de kilomètres en remaniant sa « courbe de lit » ; le changement serait récent puisque le modelé n'a pas varié.

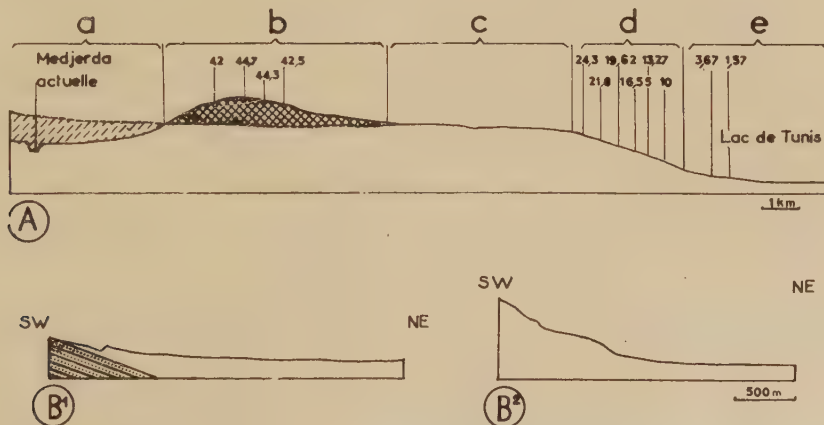


FIG. 3. — Ancienne vallée de Tunis.

A : Profil schématique. a : glaciais remanié du cours actuel ; b : verrou ; c : plateau où la Medjerda devait tracer des méandres ; d : pente plus accentuée entre les collines du Belvédère et de la Kasbah ; e : embouchure dans le lac de Tunis.

B : Coupe à Oued Lil. B 1 : topographie d'après le plan directeur au 5 000^e ; B 2 : hauteurs $\times 10$ pour exhausser les loupes par glissement.

Guidant les études préliminaires du barrage de Taulierville au-dessus de Tebourba, 20 km en amont du delta, mon ami R. Strohl est parvenu à distinguer, grâce à un examen particulièrement minutieux des carottes de sondage, deux cycles alluviaux séparés par une période d'érosion. Un cycle plus ancien est érodé sur une trentaine de mètres, puis remblayé par des dépôts plus jeunes. Cette oscillation des altitudes pourrait logiquement résulter du remaniement de la « courbe de lit » consécutif au changement de vallée en aval.

II. L'environnement climatique des phénomènes de sédimentation.

Ce sont les facteurs climatiques qui confèrent leur aspect et leur sens aux phénomènes continentaux, dont l'interprétation est impossible sans connaissance préliminaire de la météorologie régionale.

Le climat actuel de Tunis peut être défini par la température, la pluviométrie, l'hygrométrie, l'insolation, les vents (fréquence, vitesse et direction) et l'évaporation. J'ai disposé des renseignements communiqués par la station de l'Office national météorologique de Tunis El Aouina, providentiellement disposée au centre de la région étudiée. Mais comme elle ne fonctionne que depuis peu, il était utile de vérifier la valeur statistique des observations en faisant appel au Service météorologique de Tunisie, installé depuis 1900 environ, et situé également à Tunis sur la colline de la Manoubia.

1. TEMPÉRATURE DU SOL. — Les valeurs des moyennes de température observées de 1925 à 1940 à El Aouina, en plein air, à 10 cm du sol (tabl. 1, nos 1, 2, 3) caractérisent un climat tempéré à hiver peu accusé.

Depuis 1950, l'O. N. M. mesure également les températures dans le sol à 30 et 60 cm de profondeur (tabl. 1, nos 4 et 5). On voit que les variations saisonnières diminuent à 30 cm et davantage à 60 cm. La protection est insuffisante en été et les maxima restent assez élevés, mais les minima de janvier à février sont très atténués, surtout à 60 cm. A partir de cette profondeur le terrain est soumis à une chaleur constamment supérieure à 14 ou 15°.

	JANV.	FÉVR.	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DÉC.
1	11,13	11,46	13,17	15,6	19,01	23,70	25,64	26,03	24,53	20,29	16,26	12,43
2	7,45	7,55	9,15	10,95	14,0	18,25	20,08	20,73	19,98	16,04	12,03	8,68
3	14,85	15,40	17,23	20,27	24,04	21,17	31,23	31,33	29,66	24,53	20,50	16,22
4	12,57	12,12	13,53	15,45	20,35	26,33	29,80	29,87	27,19	22,92	17,08	13,31
5	14,21	14,07	14,23	15,63	19,05	24,51	27,53	28,61	27,06	23,7	18,61	14,93

TABL. 1. — Température du sol.

1 à 3 : moyennes des températures à 10 cm du sol en ° C de 1925 à 1940 (1 : moyenne ; 2 : moyenne des minima ; 3 : moyenne des maxima). — 4 et 5 : températures dans le sol en ° C en 1950 (4 : à 30 cm ; 5 : à 60 cm).

2. PLUVIOMÉTRIE. — La pluviométrie fait l'objet d'observations serrées, parce qu'elle est déficiente et acquiert de ce fait une urgente importance économique.

Les renseignements sont collationnés au Service météorologique de Tunisie et des moyennes établies pour tous les points du territoire (tabl. 2).

	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	MOYENNE ANNUELLE
Tunis (1901-1940).....	67	53	45	37	20	10	3	6	39	49	51	62	442
El Aouina (1925-1940).....	57,2	46,6	45,9	27	23,4	4	2,2	1,8	33,8	47,8	48,8	61,9	

TABL. 2. — Pluviométrie : moyenne mensuelle en millimètres.

Au Service météorologique de Tunisie, la pluviométrie est également résumée par saisons de 1901 à 1940 : Hiver : 182 mm. — Printemps : 102 mm. — Été : 19 mm. — Automne : 139 mm.

On remarque la sécheresse estivale ; les périodes pluvieuses sont très définies. J'ai pensé à comparer le total des précipitations avec le nombre de journées de pluie. J'ai obtenu ce nombre en additionnant tous les jours de pluies relevés de 1901 à 1940 au Service météorologique de Tunisie.

	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	TOTAL ANNUEL
Pour 40 ans ...	523	469	433	363	273	193	76	91	279	372	433	530	4 046 jours
Moyenne annuelle.....	13	11,5	11	9	6,8	4,8	2	2	7	9	10,8	13	101 —

On peut ainsi faire le rapport de la hauteur totale de la colonne d'eau mensuelle, au nombre de jours pluvieux.

J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	TOTAL
5	4,5	4	4	3	2	1,5	3	5,5	5,5	4,5	5	4,5 mm/jour

Les valeurs sont établies pour 40 ans. En exceptant la pluviosité insignifiante de l'été, il tombe une moyenne de 5 mm d'eau pour chaque journée de pluie, ce qui représente une précipitation relativement importante. Il faut remarquer que le fait de prendre des moyennes atténue les phénomènes et que généralement les chutes d'eau dépassent 5 mm. Un examen plus détaillé, qui ne trouve pas sa place ici, montre des chutes fréquentes de 10 à 15 mm ou davantage en quelques heures et ne découvre qu'exceptionnellement des périodes prolongées de faible précipitation. Les pluies sont donc à la fois rares et violentes.

3. HYGROMÉTRIE. — L'hygrométrie est relevée à El Aouina depuis quelques années, mais les renseignements n'étaient pas encore collationnés en 1951. J'ai dépouillé moi-même les cahiers d'observations de 1944 à 1950 et j'ai calculé les moyennes.

On utilise un thermomètre humide que l'on compare à un thermomètre sec. La différence des températures renseigne sur la rapidité de l'évaporation et par suite sur le degré d'humidité de l'atmosphère ambiante ; les valeurs sont calculées en pourcentage de saturation, 100 % correspondant à l'égalité entre les deux thermomètres. On effectue trois lectures quotidiennes à 6 h, 12 h et 18 h T. M. G.

	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.
6 h.....	82,3 %	84,3 %	84,3 %	82,8 %	76,5 %	70,8 %	71,5 %	76,7 %	80,5 %	84,8 %	84,3 %	83,2 %
12 h.....	65,7	69,2	59,3	58,3	65	48,4	44,2	46,0	51,0	56,4	63,4	66,2
18 h.....	76,2	79,5	75,4	71,3	65,5	58,3	56,4	62,0	67,7	73,9	79,1	79,7

L'humidité atmosphérique hivernale, nocturne et diurne, est un caractère remarquable du climat ; elle se rapproche de la saturation et persiste pendant les jours sans pluies, puisqu'il ne pleut que 10 jours par mois en hiver. En été, l'humidité est encore importante, et les chaleurs de midi ne l'atténuent que momentanément. Septembre ramène les fortes hygrométries malgré des températures encore élevées.

4. INSOLATION. — L'insolation n'est pas mesurée très régulièrement. Sans avancer de valeur précise, il ressort des tableaux de l'O. N. M. que pendant les mois d'été sa durée tend à se rapprocher de la durée du jour solaire. Elle est souvent élevée en hiver.

5. VENTS. — Les vents ne peuvent être définis au Service météorologique de Tunisie situé sur la colline de la Manoubia qui les perturbent. Ils sont une des préoccupations essentielles de l'O. N. M., qui les caractérise par la direction, la vitesse et la fréquence. L'O. N. M. examine aussi les variations avec l'altitude, mais seuls nous intéressent les vents dits « au sol », jusqu'à environ 300 m.

Les relevés sont effectués à 6 h, 12 h, et 18 h T. M. G. Des tableaux établissent les moyennes des vitesses et des directions en fonction des fréquences rapportées à 1 000 observations, pour la période allant de janvier 1944 à décembre 1950 (tabl. 3 et 4).

Ils sont souvent violents, atteignant 28 m/sec. à El Aouina ; les calmes sont rares. La sédimentation littorale dépend de leur direction. La station de Bizerte mesure les vents du large rencontrant le littoral nord. Nous reproduisons le tableau des fréquences pour 1 000 des vitesses

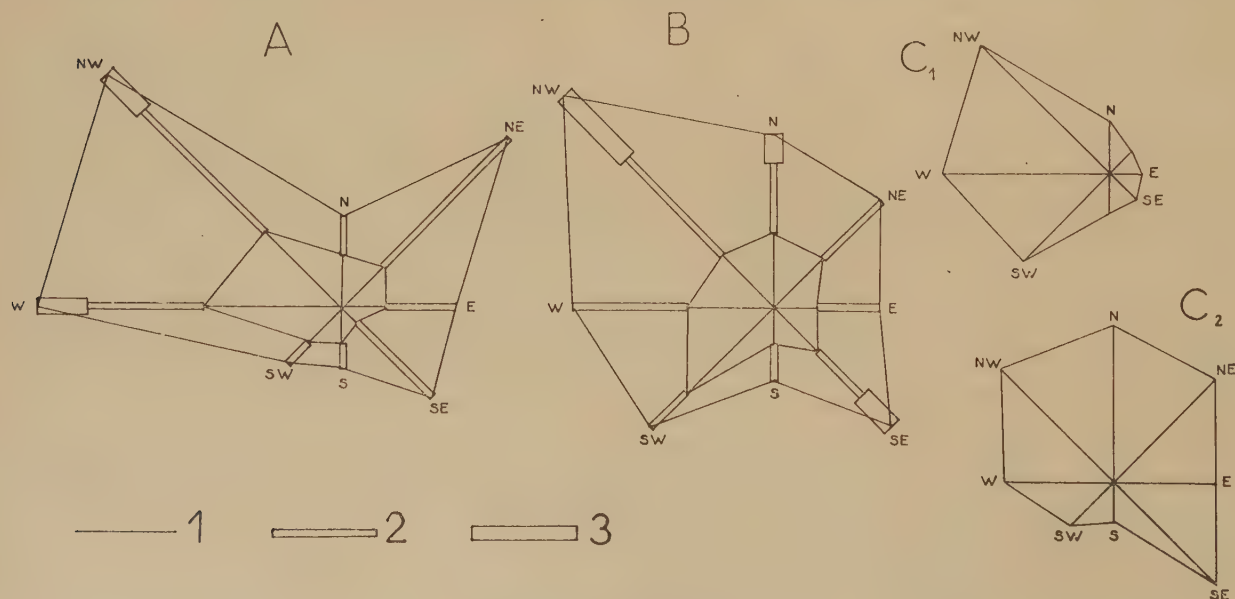


FIG. 4. — Rose des vents.

A et B : Fréquence et vitesse dans huit directions (A : à Bizerte ; B : à Tunis), 1 : vitesse < 4 m/sec ; 2 : comprises entre 4 et 8 m/sec ; 3 : > 8 m/sec.

C : Vents saisonniers à Tunis. C 1 : de novembre à mars (vents synoptiques des figures isobariques) ; C 2 : d'avril à octobre (vents locaux).

dans 16 directions. Les résultats ont été traduits au moyen d'une rose des vents graphique (fig. 4 A). Elle a été réduite à 8 directions en ajoutant moitié par moitié sur les axes restants les vecteurs des bissectrices supprimées. Elle montre une prédominance générale N avec des différences sensibles entre NE et NW.

VITESSE EN m/sec.	0-1	1,1-2	2,1-4	4,1-6	6,1-8	8,1-11	11,1-14	14,1-17	17,1-20	20,1-24	24,1-28	> 28	TOTAL
Direction													
BIZERTE (1944-1950)													
N		68	151	106	26	17	4	4					376
NNE		55	75	44	29	9	4						216
NE		65	224	323	133	31	15		2				793
ENE		20	91	154	107	31	7						410
E		42	139	112	48	29	18	3	2	2			395
ESE		20	75	58	68	62	31	4	7				325
SE		36	83	89	63	47	15	15	4			2	354
SSE		17	37	42	49	9	11		4				169
S		77	91	75	42	11	8						304
SSW		20	34	27	11	2	5		2				101
SW		102	93	75	29	13	2	2					316
WSW		65	102	55	46	24	9	2	1				304
W		299	393	305	206	127	64	13	9			2	1 418
WNW		79	204	240	204	138	59	13	4				941
NW		162	397	512	281	148	56	16	3	2			1 577
NNW		37	96	115	33	17	9						307
Calme	1 694												1 694
Total	1 694	1 164	2 285	2 332	1 375	715	317	72	38	4		4	10 000
TUNIS (1944-1950)													
N		69	108	149	110	77	30	09				04	556
NNE		49	139	148	96	43	08		02				485
NE		96	225	181	105	13	04						624
ENE		33	107	74	44	13	04						275
E		35	93	87	51	21	07						294
ESE		36	130	126	97	98	20	08	03				518
SE		95	168	112	117	102	52	20	04				670
SSE		23	69	53	62	44	31	10	02				294
S		53	59	47	24	30	11	03			03		230
SSW		84	105	46	17	16	03	02					273
SW		193	303	110	38	26	07			02			679
WSW		120	264	135	70	31	16	02				02	640
W		82	195	159	110	84	26	02	02	02			662
WNW		66	141	110	121	108	65	35	13	03	06		668
NW		74	208	233	226	223	125	53	16	02			1 160
NNW		43	154	162	133	122	43	16	03				676
Calme	1 296												1 296
Total	1 296	1 151	2 468	1 932	1 421	1 051	452	160	45	09	09	06	10 000

TABL. 3. — Vitesses des vents en fonction des directions.

Ce sont ces vents qui engendrent les houles qui s'engouffrent dans le golfe de Tunis, mais les transports éoliens à l'intérieur du golfe affectent une direction un peu modifiée par l'orographie, les falaises de Porto Farina protégeant des vents du NW. Les moyennes de la station de Tunis El Aouina sont données (tabl. 4) et illustrées également avec une rose des vents (fig. 4 B). Les vents assagis y sont moins différenciés. L'aire de répartition se resserre vers le N. L'orientation SE, dont Bizerte était protégée, est plus intense.

Les résultats restent schématiques parce que les vents sont saisonniers. Des tableaux mensuels des vitesses en fonction des directions sont en préparation à l'O. N. M., mais actuellement cet organisme ne dispose que de relevés mensuels des vitesses ou des directions séparées. Nous reproduisons le tableau des directions de Tunis et l'illustrons avec une rose des vents saisonnière (fig. 4 C). Les vents intenses et constants soufflent en hiver du NW. Ils sont liés aux grandes perturbations (cyclones et anticyclones) et sont dits « synoptiques des figures isobariques ».

DIRECTION	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	CALME	TOTAL
Janvier	25	18	31	8	15	14	11	25	41	35	100	107	157	88	124	41	160	1 000
Février	50	17	22	5	30	24	45	15	20	24	81	103	108	128	175	50	103	1 000
Mars.	54	48	35	21	34	31	58	25	22	23	84	51	106	71	138	72	137	1 000
Avril	70	45	68	19	38	54	141	40	13	14	38	45	62	79	103	52	119	1 000
Mai	81	80	86	35	49	49	106	51	22	8	34	38	48	37	87	57	132	1 000
Juin	100	87	111	24	48	63	101	35	13	11	29	27	40	32	92	57	130	1 000
Juillet	88	75	140	52	63	41	52	6	8	14	29	17	55	37	105	66	152	1 000
Août	86	82	108	41	69	63	71	28	23	17	38	20	32	23	72	66	161	1 000
Septembre	37	49	70	30	44	95	106	37	22	14	35	38	70	30	78	78	167	1 000
Octobre.	49	34	49	37	17	48	74	35	40	34	77	66	72	35	84	68	181	1 000
Novembre	22	16	11	5	16	14	18	19	22	54	84	100	148	106	141	59	165	1 000
Décembre	25	8	12	5	11	8	23	8	24	49	138	109	160	81	147	54	138	1 000
Année	57	47	62	24	36	42	67	27	23	25	64	60	88	62	112	60	144	1 000

TABL. 4. — Fréquences ‰ des directions de vent.

Tunis, 1944-1950 ; sur 7 671 observations.

Les vents d'été résultent surtout de l'alternance des brises de terre et des brises de mer. Les vents d'hiver réguliers ont une influence prépondérante sur les actions littorales. En définitive, on peut dire que les houles proviennent exclusivement du N et que le transport NNW éolien est à peine contrarié par une tendance estivale SE. En ce qui concerne le delta de la Medjerda, les vents d'hiver correspondent aux périodes de crues et par suite au maximum de l'apport sédimentaire d'origine fluviale.

6. ÉVAPORATION. — L'évaporation est favorisée par l'insolation, la chaleur parfois élevée et les vents, contrariée par l'humidité de l'air.

L'évaporation la plus immédiatement mesurable affecte une nappe d'eau libre : rivière, lac, étang, etc. Le Service météorologique de Tunisie l'a déterminée à l'aide de bacs flottants installés dans le lac de Tunis [Lacroux, 1932 et 1934]. De 1900 à 1930, la moyenne mensuelle varie de 87 à 270 mm, la moyenne annuelle avoisine 1 m. Toutefois ces mesures, citées pour mémoire, sont très critiquables car, avec le vent, il est impossible de protéger efficacement les bacs contre les vagues.

L'évaporation intéresse également les eaux contenues dans le sol. Ce deuxième type de phénomènes concerne les agronomes. Les méthodes de lysimétrie restent sujettes à caution et ne sont pas standard. Je reviendrai plus loin au problème de l'évaporation des eaux souterraines et le traiterai en hydrogéologue. Maintenant je m'en tiendrai à la météorologie classique qui se contente d'étudier l'évaporation en fonction de l'humidité de l'air.

La méthode des deux thermomètres nous a donné l'humidité relative au pourcentage. Elle permet avec une autre formule de calculer la tension de vapeur. On peut définir la tension maximum admissible à la température donnée par le thermomètre sec au même instant. La différence entre la tension maximum et la tension existante constitue le déficit hygrométrique.

Les calculs de tension de vapeur n'existent pas à l'O. N. M., et il aurait été trop long de les établir spécialement. Toutefois, deux exemples pris à Tunis précisent davantage le climat tunisois :

	Thermomètre		Humidité relative	Tension		Déficit hygrométrique
	sec	humide		calculée	max.	
Humidité très forte, sans pluie (15-1-1945, 6 h matin)	5°	4°6	94 %	6,07 mm	6,53 mm	0,46
Grande sécheresse, sans vent (1-7-1944, 12 h)	31°2	22°	39	14,21	33,8	19,59

Ces deux cas encadrent assez largement les valeurs moyennes d'humidité relative (p. 13), respectivement de 82,3 % et de 44,2 %.

Dans une enceinte thermodynamique expérimentale, à une pression donnée, le déficit hygrométrique conditionnerait l'évaporation. Dans la nature, d'autres facteurs interviennent (la vitesse du vent et également sa direction suivant qu'il apporte de l'air sec ou de l'air humide, l'insolation, la réverbération solaire, la pluie, etc.) et font que l'évaporation se différencie de l'hygrométrie.

La difficulté consiste en fait à trouver un procédé de mesure valable, qui permettrait de qualifier l'évaporation à l'aide d'une unité appropriée. Les services météorologiques utilisent un tube de Piche, qui mesure la quantité d'eau évaporée par une rondelle de buvard. Les résultats ne sont pas interprétables, mais l'usage de l'appareil de Piche étant normalisé dans toutes les stations, il permet des comparaisons.

Les résultats sont donnés en millimètres. A Tunis, j'ai calculé moi-même les moyennes mensuelles de 1945 à 1950. Les valeurs sont élevées. Pour comparer avec un exemple de climat tempéré quelconque, j'ai demandé communication des moyennes calculées par l'O. N. M. à Paris :

	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.
Tunis	69,9	71,9	86,3	102,7	170,0	219,6	229,7	218	169,2	110,7	82,2	64,2
Paris	22	19	47	70	74	94	108	96	78	46	37	29

Les évaporations tunisiennes sont trois fois plus intenses que les évaporations parisiennes en automne et hiver (de septembre à février), et deux fois plus intenses au printemps et en été (de mars à août). Leur période d'activité hivernale la plus caractéristique correspond aux périodes des plus fortes hygrométries. L'évaporation reste donc élevée quand le déficit hygrométrique devient très faible, cela est dû à l'action combinée du vent et du soleil.

Les comparaisons des nombres de Piche n'apportent que des indications rudimentaires. Les auteurs modernes caractérisent un climat par le rapport entre pouvoir humidifiant et pouvoir évaporateur et trouvent de nouvelles méthodes pour définir ce dernier. D'après C. W. Thornthwaite [1946, 1948], P. Preciosi, chef de la section de Climatologie de l'O. N. M. en Tunisie, calcule le *déficit en eau* et l'*excédent en eau* du sol. Voici ces résultats pour la station de la Manoubia :

	J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	ANNÉE
Déficit eau	0	0	0	0	0	105	156	150	86	37	0	0	534 mm
Excédent eau.	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3

A titre indicatif mentionnons que les cours d'eau permanents ne prennent naissance que lorsque l'excédent annuel dépasse 50 mm.

Nous découvrons ainsi un élément tout à fait spécifique du climat tunisien, habituellement mal interprété : la coexistence d'une forte humidité atmosphérique et d'un fort pouvoir évaporateur. La généralisation à l'Afrique du Nord entraînera certainement des répercussions sédimentologiques encore mal connues.

En conclusion, le climat de Tunis est tempéré avec des variations de température assez modérées entre l'hiver et l'été. Les vents soufflent avec violence. Le caractère le plus frappant, bien que généralement passé sous silence, est l'exceptionnelle humidité de l'air, contrastant avec les précipitations faibles, souvent de caractère bref et torrentiel, et ne se produisant qu'en hiver. L'impression qui se dégage est celle d'une terre intégralement soumise aux forces élémentaires, vent, soleil, pendant de longues périodes de dessication suivies de pluies dévastatrices sous une atmosphère tiède et saturée d'eau. Il est normal de la trouver ravinée, érodée, altérée, remaniée, pauvre en protections végétales et en humus.

Le climat tunisois résulte d'un conflit entre les influences continentales et des facteurs purement locaux liés au caractère lagunaire du littoral de Tunis. Pour généraliser et achever de le particulariser, il est bon de le comparer à celui qui règne dans la steppe tunisienne, limitrophe du Sahara.

La température admet des écarts plus considérables, augmentant vers le désert. La pluviométrie varie peu, elle passe à 300 mm de moyenne annuelle vers Kairouan et à 150 vers Gafsa. Les averses deviennent plus rares et plus violentes, un travail analogue à celui entrepris tout à l'heure, mené dans la région de Gafsa donne les résultats suivants :

1926 = 6	mm par jour de pluie	1931 = 15,5	mm par jour de pluie
1927 = 6	—	1932 = 16	—
1928 = 9	—	1933 = 12,5	—
1929 = 16	—	1934 = 10,5	—
1930 = 7,5	—	1935 = 12	—

L'insolation est semblable. Les fréquences et vitesses des vents aussi, plutôt un peu plus faibles à Gafsa par exemple. La seule vraie différence concerne l'état hygrométrique (42 % de moyenne annuelle à Metlaoui p. ex.). A l'inverse de Tunis, le Sud devient remarquable par la sécheresse de l'atmosphère. Au milieu de ses lagunes et de ses sebkas, Tunis se distingue de l'intérieur du pays par l'humidité de l'air et la régularité de la température.

*
* * *

Les données thermodynamiques précédentes définissent la période actuelle, mais ne permettent d'aborder l'histoire des climats au cours du Quaternaire que d'une manière indirecte. En Afrique du Nord, d'ailleurs, les variations n'ont pas dû être aussi accusées que dans les régions qui ont subi les classiques glaciations, et c'est sans doute pourquoi cette histoire n'est pas encore connue d'une façon tellement précise. Parmi les essais de synchronisation avec l'Europe, on peut citer ceux du géographe égyptien S. A. Huzayyn [1941]. Mais en l'absence de données réellement indiscutables, il vaut mieux se méfier actuellement de certaines déductions.

Pour les périodes les plus récentes, une légende prétend que la sécheresse s'accuse depuis les temps historiques et que les Romains auraient eu affaire à un pays plus humide et plus fertile. Elle rappelle à ce propos la définition de la Tunisie « grenier à blé de l'Europe ». Mais la culture d'alors utilisait des instruments rudimentaires, le rendement à l'hectare était très faible quel que soit le climat, et ce qui importait à l'agglomération surpeuplée de Rome, c'était d'emblaver de vastes superficies, qu'elle trouvait en Tunisie dans des conditions probablement très semblables à celles d'aujourd'hui.

Les conditions particulières dans lesquelles se sont sédimentées certaines roches ne permettent pas toujours non plus de définir des variations climatiques générales. Pour choisir un exemple

dans notre région d'étude, une accumulation accidentelle de feuilles trouvées dans un épisode deltaïque de transport à côté de restes de Vertébrés étudiés par C. Arambourg [1949] ne signifie pas nécessairement que le Villafranchien soit humide. Pour prendre un autre exemple, R. Laffitte [1940] proposait que le Villafranchien devienne chaud à son sommet à cause de concrétions ferrugineuses et s'achève par un épisode sec à cause d'une surface encroûtée pâle, mais on comprend aujourd'hui combien on ignore le régime des migrations du fer.

Les variations de température supposées par les changements faunistiques n'influent pas nécessairement non plus d'une manière simple sur la pétrographie sédimentaire, qui dépend beaucoup des teneurs en eau. Sans vouloir nier les cycles climatiques quaternaires nord-africains, il reste permis de penser qu'en ceux-ci ont pu s'intercaler de longues périodes, où le climat ressemblait à celui d'aujourd'hui. En fait, dans le cadre de cette étude essentiellement locale et en l'absence d'indices bien nets, on trouvera *plus commode* de rapporter la sédimentation, même celle du Quaternaire ancien, aux actions climatiques actuelles, les seules dont il soit possible de déterminer simultanément toutes les données d'une façon quantitative. On verra que c'est toujours possible.

CHAPITRE PREMIER

UNITÉ CYCLOTHÉMATIQUE UTIQUIENNE

I. Hydrographie de la Medjerda.

La Medjerda prend sa source dans le Constantinois à 1 100 m d'altitude, non loin de Khamissa, et draine les Hauts-Plateaux. Elle traverse la Kroumirie dans des gorges jeunes, puis reçoit le Mellègue qui apporte les eaux de la province de Tebessa. Elle se termine en méandres paresseux dans une vallée alluviale, parfois large de 20 km et longue de plus de 200 km, où elle ne perd que 200 m d'altitude. Elle y reçoit l'Oued Siliana qui lui apporte les précipitations de la Tunisie centrale.

La surface des bassins versants est évaluée à environ 20 000 km². Le Constantinois a une pluviosité annuelle d'environ 800 mm à 1 m en précipitation hivernale; l'érosion y est active. L'érosion est également puissante dans la province de Tebessa, soumise à un régime semi-désertique avec des pluies hivernales violentes et rares. Très attaquée aussi par le ravinement, la dorsale tunisienne reçoit des pluies hivernales médiocres (env. 400 mm annuels). Il en résulte un débit irrégulier du fleuve, avec des crues hivernales transportant un débit solide abondant, et des étiages estivaux dont l'eau concentrée par l'évaporation est riche en sels dissous.

Son régime a été minutieusement étudié dans le cadre des grands travaux d'aménagement de la basse vallée entrepris par la Régence et qui ont reçu une nouvelle impulsion depuis 1945. Un barrage-réservoir régularisera le cours du Mellègue, complété par des barrages sur la Medjerda à Testour, et au fil de l'eau à Taulierville en amont de Tebourba, au débouché du delta. La plaine deltaïque elle-même doit être drainée dans ses parties basses et irriguées dans ses parties hautes. E. Berkaloff a fait établir des déversoirs le long de la Medjerda et du Mellègue, et multiplie les observations qui sont publiées dans des fascicules annuels ¹. La Société « Neyrpic » détermine sur modèles réduits des procédés pour assurer le drainage par le raccourcissement des méandres, en liaison avec Cl. Collet, ingénieur hydraulicien de la Direction des travaux publics de Tunisie. Nous examinerons successivement le débit, le résidu sec, le débit solide.

DÉBIT. — Je donne ici les débits mensuels moyens évalués en milliers de mètres cubes au poste de Medjez El Bab, c'est-à-dire en aval du confluent avec la Siliana, par E. Berkaloff. Le nom de Medjez El Bab (le passage du gué) suppose une localité établie en un lieu de franchissement facile du fleuve.

J.	F.	M.	A.	M.	J.	J.	A.	S.	O.	N.	D.	ANNÉE
83,5	88,5	120	112,5	52	21,5	11,5	14,5	12	22	21	20	579

1. Direction des travaux publics de Tunisie, Bureau de l'inventaire des ressources hydrauliques, Recueil des observations hydrométriques.

L'opposition entre crues hivernales et étiages estivaux est montrée par ces deux chiffres : de janvier à mai = $456 \times 10^3 \text{ m}^3$ — de juin à décembre = $123 \times 10^3 \text{ m}^3$.

E. Berkaloff calcule également le débit moyen et le débit maximum de chaque journée en mètres cubes par seconde. En août 1950 le débit moyen varie de 1,46 à 30,70 m^3/sec . Le 3 avril 1949 le débit moyen atteint 251 et le débit maximum 297 m^3/sec .

Il réunit encore les observations de 1910 à 1952 et calcule un diagramme probabiliste des crues en mètres cubes par seconde en les rapportant à une courbe de Gauss. Les abscisses sont celles d'une courbe de Gauss logarithmique. Il y porte les fréquences, tandis qu'en ordonnée il porte les débits sur une échelle également logarithmique. Son diagramme de Medjez El Bab est représenté fig. 5. L'extrapolation a été poussée jusqu'à la crue millénaire.

Le débit est très modeste si on le compare à celui du Mississippi : 19 800 m^3/sec . en moyenne à l'embouchure pour une surface drainée de 1 million de km^2 (M. Baulig), 180 000 pieds cubes par seconde pendant les basses eaux, 950 000 pendant les hautes eaux ¹ (J. R. Russel), ou même à celui du Rhône : 1 780 m^3/sec . en moyenne à Beaucaire avec des crues de 10 500 m^3/sec . à Avignon [Pardé, 1925]. Il se distingue davantage encore par son irrégularité, avec des étiages inférieurs même parfois à ceux de l'Ardèche par exemple (8 m^3/sec . en étiage).

RÉSIDU SEC. — Ils varient parallèlement au débit. De nombreuses analyses sont colationnées par E. Berkaloff.

Par exemple à Souk El Khemis, après le confluent avec le Mellègue, en mars 1950 au cours d'une crue de 89,50 m^3/sec ., le résidu sec était de 550 mg/l. Les têtes de crue au début de l'hiver sont un peu plus chargées parce qu'elles lessivent des terrains salés par les évaporations estivales. Le tabl. 5, d'après E. Berkaloff, précise la manière dont la salure croît en étiage. Les numéros correspondent à huit postes étagés le long du cours, depuis la frontière à l'entrée de la plaine alluviale jusqu'au delta.

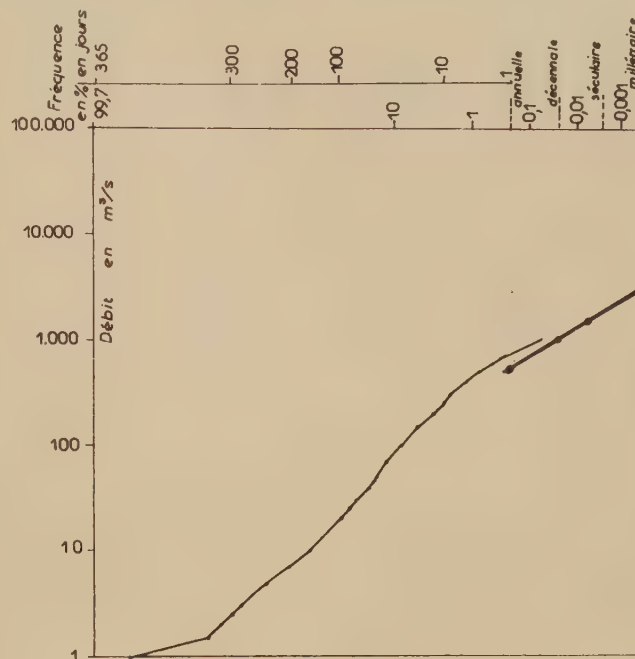


FIG. 5. — Débit de la Medjerda.

— : débits maxima de la journée (1933-1952) ; — : crue maximum de l'année (1910-1952).

DATES	ANNÉES	1	2	3	4	5	6	7	8
26-29 juillet.....	1951	—	1 456	1 436	—	2 628	3 112	—	3 600
7-11 août.....	1950	1 920	1 360	1 420	1 440	2 080	3 000	3 520	3 720
18-22 août.....	1947	—	—	—	—	2 440	—	3 250	—
23-28 août.....	1948	—	1 264	1 262	1 366	—	3 152	3 328	4 572
19-29 septembre.....	1949	—	—	1 400	1 440	—	—	3 650	—

TABL. 5. — Salure le long du cours de la Medjerda en mg/l.

A noter que le confluent avec le Mellègue se trouve entre les postes 5 et 6 et le confluent avec la Siliana entre les postes 6 et 7.

Le tableau montre l'accroissement progressif de la concentration vers l'aval, qui devient rapide près de l'embouchure où l'indice d'écoulement est très faible ; on constate aussi une augmentation saisonnière surtout nette en aval, qui reste perceptible malgré une grande irrégularité annuelle.

1. Respectivement environ 8 000 m^3/sec . et 49 000 m^3/sec .

DÉBIT SOLIDE. — Nul en étiage, il augmente avec l'importance des crues. Sa mesure est un difficile problème, car la charge unitaire en matériel transporté croît avec la profondeur et il est nécessaire de faire des prélèvements à différents niveaux. En outre, une tranche solide d'une épaisseur indéterminée avance sur le fond par traction avec une vitesse qu'on ne sait pas évaluer. Enfin l'immersion d'un récipient entraîne des perturbations hydrodynamiques, écartant les filets d'eau, et détournant ou accumulant les particules en suspension.

« Neyrpic » utilise un « turbidisonde », récipient d'environ 2 m d'allongement, au profil étudié, qui contient une bouteille maintenue vide jusqu'à l'instant du prélèvement par un jet d'air comprimé. Il lui a donné un poids de 80 kg, qui assure son immobilité et permet même de l'enliser dans le fond plastique.

Nous donnons quelques mesures effectuées à Djedeïda et Protville :

	Débit	V. écouL.	à 0,50 m	à 1,50 m	à 2,50 m	au fond
Djedeïda	210 m ³ /sec.	2,10 m/sec.	9,87 g/l	10,35 g/l	11,65 g/l	
—	120	1,50				9,425 g/l
Protville	262	2,50	17,4	17,9	24,9	

Les études sont en cours : Cl. Collet en prépare une synthèse, dont il m'a communiqué ses conclusions actuelles (1953), sous réserves de précisions ultérieures. Il admet comme ordre d'idées un débit moyen annuel à l'embouchure de 1 milliard de mètres cubes : 500 millions proviendraient de crues supérieures à 80 m³/sec., 500 millions d'étiages inférieurs à 80 m³/sec. Pour la première tranche, il admet un débit solide moyen de 25 g au litre, et de 10 g au litre pour la deuxième, soit un total d'environ 17 millions de tonnes de sédiment annuel.

Malgré son faible écoulement, le débit solide proportionnellement considérable rapproche la Medjerda des fleuves qui construisent les plus grands deltas. Si elle reste encore loin du Mississipi avec ses deux millions de tonnes par jour [Russel, 1936], elle avoisine le Tigre et l'Euphrate. G. M. Lees et N. L. Falcon indiquent, en effet, pour l'Euphrate à Ramadi : 553 g par m³ et 700 m³/sec. ; pour le Tigre à Badgad : 787 g par m³ et 1 240 m³/sec. en valeur moyenne [Lees et Falcon, 1952], soit au confluent 1,4 g au litre et un total annuel grossièrement double de celui de la Medjerda. Dans la Géographie universelle de Vidal de la Blache, A. Bernard [1937] écrit que si la Medjerda est le seul fleuve de Berbérie à construire un delta, c'est parce qu'elle débouche dans une baie. Mais elle paraît surtout remarquable par l'importance de son apport solide.

Cl. Collet le rattache d'une manière imagée à la fois à l'érosion du bassin versant et à la sédimentation deltaïque. Étant donné la densité, le poids annuel est celui d'une tranche de 10 cm arrachée ou ajoutée à 100 km². Cela suppose une érosion annuelle de 0,5 mm de l'ensemble du bassin versant, tout à fait en accord avec les dégradations que l'on peut y voir.

La finesse des éléments est un caractère aussi essentiel que l'abondance du transport. Elle résulte du caractère marneux ou marno-calcaire des plateaux constantinois et des vallées de Tebessa, de leur éloignement et du fait que l'indice d'écoulement devient très faible 300 km en amont du delta. Il n'y a jamais trace de galets. Cl. Collet a fait procéder à de nombreuses analyses granulométriques au densimètre. Elles donnent des résultats très voisins, prouvant en outre l'homogénéité du transport. Nous reproduisons quelques exemples en courbes cumulatives semi-logarithmiques (fig. 6 A). Les échantillons 1 et 2 montrent la finesse moyenne du transport. Les échantillons 3 et 4 résultent d'un tri. Les paliers et points d'inflexion du 3 traduisent des variations de vitesse en cours de crue avec des reprises et des remaniements peu simples ; le 4 est un sable.

Pour permettre d'examiner les indices granulométriques Ng de ces courbes, la fig. 6 B les ramène à leurs formes canoniques (voir chap. III, granulométrie). Les échantillons 1 et 2 sont particulièrement intéressants du fait qu'ils ont été prélevés en pleine eau, ce qui est exceptionnel. Ils

présentent des faciès évolués assez semblables de *décantation*, celle-ci étant toutefois un peu plus poussée à 2 m de profondeur (Ng passe de $-0,9$ à -1). La courbe de l'échantillon 3 au fond du lit, rectiligne dans le système de coordonnées adopté, traduit une granulométrie logarithmique qui caractérise par excellence les faciès de transport, sans *décantation* ni *lévigation* prédominante ; on peut penser que ces deux mécanismes de dépôt se compensent. Les berges sont formées de dépôts à faciès parabolique (Ng = 0,8) montrant une évolution moins poussée que celle des sédiments entraînés sur le fond.

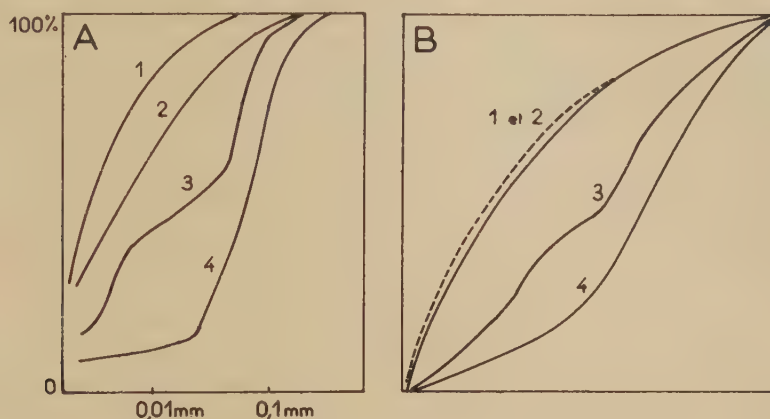


Fig. 6. — Répartition granulométrique du transport solide dans la Medjerda en crue.

A : Courbes cumulatives avec des abscisses semi-logarithmiques. — B : courbes canoniques (100 % sur les ordonnées = le logarithme de la différence entre les plus grandes et les plus petites particules sur les abscisses).

1 et 2 : types de prélèvement d'eau au turbisonde (2 : à 2 m de profondeur) ; 3 : dépôt de fond prélevé à la benne au cours d'une petite crue ; 4 : dépôt de sable laissé sur la berge par une crue en aval de Protville.

On découvre que la théorie de l'évolution granulométrique des sédiments s'applique non seulement à leur répartition dans un bassin, mais même à leur répartition granulométrique instantanée. Le caractère fin de l'ensemble du transport solide était favorable à la mise en évidence d'un résultat nouveau comme celui-ci.

II. Évolution littorale actuelle du delta.

Actions maritimes. — Morphologie côtière et sous-marine (rides sous-marines, vasières). — Dérivations périlittorales. — Aspect d'ensemble.

Si l'on s'écarte de la route de Tunis à Bizerte, on voit les cultures devenir clairsemées puis disparaître. L'accès des plages est rendu difficile par des lises, terres mouvantes parfois dissimulées sous un manteau végétal halophile ; elles protègent les lagons où pullulent les oiseaux sauvages, canards, grues et cigognes. Pendant l'hiver les grues restent en bandes et animent le ciel de leurs vols groupés, puis elles émigrent vers la Scandinavie, remplacées par les cigognes arrivant d'Afrique centrale pour nidifier. J'ai assisté en septembre 1952 au rassemblement des couvées et à leur envol, le nombre des individus peut s'évaluer à plusieurs milliers.

Du côté de la mer les hauts-fonds rendent la côte dangereuse. Cette solitude palustre incite aux rêveries des reconstitutions paléogéographiques ou paléontologiques : rivage en transformation modelé par les apports sédimentaires, dans les anses duquel s'accumulent le matériel végétal marin de futures tourbières ; restes de Poissons ou d'Oiseaux jamais dérangés attendant leur fossilisation ; empreintes de Ruminants ou d'Équidés égarés creusées dans les vases et parfois

remplies d'un moulage de sable humide susceptible de les fossiliser. Ensemble géologique en formation que dominent les lointains bleutés de l'orogénèse antérieure en voie de destruction : Lias ou Crétacé du Ressas, du Bou Kornine, du Zaghouan, de l'Ichkeul.

La Medjerda trace ses méandres à travers le bas delta et la hauteur des berges diminue vers l'embouchure. De 15 m au pont de Djedéïda, elle descend à 8 ou 10 m au pont de Protville, 4 ou 5 m à Galaat Andleuss, puis s'abaisse à 50 cm ou 1 m, ce qui semble indiquer que la partie amont du delta est en voie de surélévation. 10 km avant la mer, les berges se réduisent à un étroit boulevard de limon découpé par des drains, séparant mal le fleuve des lagunes aux lises vaseuses. Galaat El Andleuss (la forteresse des Andalous), mot qui reviendra souvent, désigne un village. Galaat, littéralement la forteresse, s'applique par extension à un plateau, une croupe, et signifie que le village occupe un promontoire surélevé au milieu des fondrières, une sorte d'îlot de Pliocène marin. Les Andalous sont les Maures chassés d'Andalousie par les rois catholiques. Les notables s'arrêtèrent dès le Maroc, embelli par leur civilisation, mais les éléments les plus misérables ont dû traverser tout le Moghreb, avant d'échouer dans ces marais.

L'abaissement des berges permet aux crues de s'épandre en amont, en fertilisant les derniers champs. Les ingénieurs de la Direction des travaux publics de Tunisie ont essayé d'en profiter pour raccourcir les méandres. En 1946, ils ont prolongé un drain de l'amont de Galaat Andleuss à la mer, en ouvrant une tranchée au bull-dozer. Ils espéraient créer une embouchure à 10 km au S de l'embouchure actuelle, mais les apports de crue se répandirent très largement et colmatèrent la voie qui leur était proposée. La Société « Neyrpic » étudie sur modèle réduit la possibilité de la maintenir ouverte, en détournant vers le lit géographique les plus grosses crues, les plus chargées en apport solide.

Auparavant la Medjerda se jetait plus au N à travers la lagune de Porto Farina. Elle a été artificiellement amenée à son lit actuel depuis 1880, par de petits travaux qui se sont contentés d'aider la dérive naturelle, qui tend à se faire dans cette direction et dont je donnerai plus loin l'explication. D'après les observations de M^{me} Bellair-Baudier et de P. Bellair [1951] la Medjerda engendrait un courant de chasse en traversant la lagune et la fermeture s'est produite après le détournement, accompagnée, comme dans toute lagune privée d'affluent et d'émissaire, d'un comblement partiel. D'une manière générale, pour l'ensemble de la baie limitée par les caps Farina et Gammart, le profil d'équilibre du littoral est en cours de remaniement. Son avancée est due aux 17 millions de tonnes annuelles de l'apport fluvial. Il semble en être de même que pour le delta du Rhône, pour lequel M^{me} Duboul-Razavet [1949 a] a montré que le fleuve joue le rôle essentiel par la masse de ses apports.

Dans le débit solide il y a des limons en suspension, qui se dispersant par flottation, sont soumis à la fois aux courants et aux vagues et peuvent subir un triage plus poussé. Les éléments plus grossiers roulant sur le fond peuvent continuer à cheminer par traction et seront entraînés par les houles et les courants de fond ; il est difficile de suivre leur marche mais on peut identifier les emplacements où ils s'accumulent. Il faut donc étudier l'action des vents, des courants qu'ils engendrent, et des houles, à la fois sur les suspensions et sur les sables, avec leurs incidences sur la morphologie côtière et sous-marine.

ACTIONS MARITIMES. — Le vent du Nord dominant est parallèle à la direction de la côte et balaie tangentiellement les plages. Mais la barrière pliocène de Porto Farina, haute de 200 à 300 m, protège le fond de l'anse. La ligne qui joindrait les caps Gammart et Farina se trouve séparée du large une baie protégée des plus gros temps, où se développe une houle locale normale au rivage qui, en raison des fonds plats, commence à déferler très loin des bords. Toutefois le promontoire du cap Farina n'est pas assez saillant pour assurer une protection totale de la

baie. Par vent violent ou hâlant au NE, la houle du large frappe obliquement, et les plages des promontoires de Foum el Oued et de Gammart, ouvertes au N, y sont particulièrement exposées.

Les inflexions du rivage sont susceptibles de provoquer de curieuses réfractions de houles. La photo aérienne montre comment le crochet distal de Foum el Oued réfléchit une onde visible sur plus de 1 km (Pl. I).

Ce régime très particulier de vent tangential imprime une physionomie spéciale au remblaiement. Au large, les vents et les courants portent au S, mais à la frontière de l'anse, des contre-courants prennent naissance ramenant les eaux vers la terre et provoquant des mouvements giratoires. Une faible partie seulement des matières en flottation peut s'éloigner et se disperser dans le golfe de Tunis, la plus grande quantité reste confinée au fond de la baie, s'y déplaçant au gré des tourbillons qui seraient d'ailleurs favorables au dépôt. En effet, d'après J. B. Leighly [1932], le brassage irrégulier lié aux tourbillons ménage des zones d'eau calme où le matériel se concentre et peut sédimenter. L. Glangeaud [1938] attribue également aux mouvements tourbillonnaires la formation des bouchons vaseux de l'estuaire de la Gironde.

Si le matériel alluvial s'éloignait, il ne pourrait que s'accumuler au fond du golfe, mais le rivage est stable à Tunis, confirmant qu'ainsi la majeure partie du débit solide ne dépasse pas la baie. Sur le fond plat où les eaux sont sollicitées à la fois par les houles, les vents et les courants, l'observation à la lunette de plongée, poursuivie jusque vers 6 m de profondeur, montre que l'agitation se propage jusqu'au fond qui est balayé par des sables en déplacement, parfois entraînés dans des mouvements tourbillonnaires à axes plus ou moins verticaux semblables à de petites trombes. Les sédiments en suspension diminuent d'ailleurs la transparence ; le dépôt semble s'effectuer chaque fois que la charge en trouble dépasse la compétence.

La teinte laiteuse conférée aux eaux par la charge sédimentaire est particulièrement visible sur les photos aériennes. Au cours des longues périodes de calme estival la compétence est plus faible vers l'embouchure, et à son voisinage le dépôt est aussi rapide que les apports, eux-mêmes diminués en période de basses eaux. A une distance suffisante, vers Gammart ou Porto Farina, la limpidité reparaît. Une période de gros temps, élevant la compétence, met le sable en suspension et homogénéise l'ensemble. Quelques jours après le retour au calme, le dépôt des suspensions réduit au minimum la turbidité. En hiver une forte turbidité générale est constante.

Les contre-courants d'allure giratoire, qui agitent les hauts fonds littoraux et dont il n'existe d'ailleurs pas actuellement de cartes détaillées, tendent à répartir les sédiments dans l'ensemble de la baie, mais les vents ont une action différente, car ils ont tendance à déporter vers le S tout ce qui est mobile. Le mode de transport apparaît sur le montage de photographies aériennes (Pl. I). Malheureusement la mission avait pour objet de dresser une carte topographique et ne renseigne sur le domaine maritime qu'au voisinage immédiat du littoral. On observe des zones concentriques d'égales dispersions, correspondant aux apports des crues successives. Au centre les zones les plus récentes, où les apports n'ont pas eu le temps de se disperser, ressortent en blanc. La dernière d'entre elles a passé au travers de la précédente. Les vents déplacent d'ailleurs vers le S les sédiments en cours de dispersion. Les teintes apparaissent tranchées, l'absence de mélange aux limites des zones n'a presque sûrement pas d'autres causes que la rapidité du déplacement. On devine même les perturbations apportées par le crochet terminant le cordon littoral. Au N de la Medjerda il semble que l'on distingue un transport analogue, c'est celui des suspensions d'abord entraînées vers le cap Farina par les courants giratoires.

Sollicité par ces forces composées le matériel maintenu dans la baie se déplace, se décantant ou revenant en suspension. Le déport vers le S modèle en grande partie les formes du littoral, comme on le montrera en étudiant la morphologie côtière et sous-marine. Mais il y a en outre

un mouvement de retour à la côte, qui est essentiel parce qu'il affecte un pourcentage important du volume des alluvions.

Des observations précises ont été effectuées en un point commode, au débouché de la lagune de Porto Farina. Depuis 1898 la lagune est concédée pour la pêche à un amodiatiaire, M. Pisani, qui a barré la passe avec deux digues pleines en ciment, reliées l'une à l'autre par une digue à lunettes et des bordigues de grillage, dans lesquelles est ménagée une porte pour le passage des barques (fig. 9). Le cahier des charges lui impose d'entretenir la passe. Il définit ce demi-siècle comme une lutte inégale et perpétuelle contre les sables et a l'impression que l'ensablement s'accélère les dernières années jusqu'en 1949, quand l'administration imagine que son barrage en restreignant l'arrivée des eaux de mer accélère le comblement de la lagune, et ne renouvelle pas la concession. R. Bellair-Baudier et P. Bellair ont parfaitement vu que le sable vient du large et que la digue protégeait au contraire la lagune ; ce comblement par des apports marins étant d'ailleurs un phénomène des plus classiques. L'amodiatiaire procède à des sondages multiples, creuse à la pelle, établit des digues de fortune, prend conseil auprès de J. Laurent. Voici le détail des ultimes années de 1947 à 1949 (fig. 9 C).

Le 23 novembre 1947, le passage entre les bancs de sable qui mène à la porte des bordigues a de 20 à 60 cm de tirant d'eau. On creuse un chenal de 30 cm à travers le cordon littoral ; ce travail rafraîchit la passe en établissant des courants plus forts et le 28 novembre le chenal s'est approfondi de lui-même de 70 cm, et il existe en arrière du cordon littoral des fonds de 140 cm. Le 18 février 1948, la profondeur atteint 2 m, mais facilite la pénétration du sable qui s'accumule d'abord contre la digue où il n'y a plus que 1 m d'eau ; le 2 mars un flot obstrue la passe et les fonds sont à 80 cm. Le 27 novembre, quand il s'agit de remettre la pêcherie en fonctionnement après l'arrêt de l'été, le chenal est complètement atterri. Le creusement d'un nouvel accès donne lieu aux mêmes phénomènes ; le courant déblaie d'abord et le fond atteint 3 m le 9 mars 1949 ; puis le sable s'accumule et le 2 juin il n'y a plus que 60 cm ; le 18 décembre, l'ouverture persiste encore, mais les fonds sont faibles devant les bordigues. En mars 1953 on pouvait voir que la digue abandonnée avait fixé un banc de sable rendant aléatoire le passage des barques. Dans les parties abritées du courant les vasières commençaient à s'installer.

L'espace compris entre la digue et la côte représente 300 ou 400 hectares. La rapidité avec lequel il s'atterrit montre l'importance de l'apport sableux. Les phases fines sont entraînées vers le fond de la lagune, et leur abondance est d'autant plus grande qu'elles sont beaucoup mieux représentées que le sable dans le débit solide de la Medjerda. Cette sédimentation déjà remarquable s'accomplit au N du fleuve, au S où on ne peut la mesurer aussi directement, elle est certainement plus intense par suite de la convergence de l'action des vents et des courants.

En même temps il s'accomplit un triage. Les fonds, à prédominance sableuse sur le rivage, deviennent vaseux à partir des isobathes, 25 ou 30 m. La ceinture vaseuse périlittorale y est généralisée. Pour A. Rivière [1951] son dépôt est lié à l'excès de la charge sur la capacité de transport. Dans la région étudiée ici il semble que les troubles qui pourraient être remis en suspension sont ramenés vers la côte par des courants de fond, ce qui expliquerait le caractère localement très vaseux de la sédimentation au rivage. Il est remarquable que la limite de la ceinture vaseuse du côté « amont » suive la frontière entre l'anse (limitée par les caps Gammart et Farina) et le golfe de Tunis. Peut-être y a-t-il là une brusque diminution de la turbulence au voisinage du fond ?

MORPHOLOGIE CÔTIÈRE ET SOUS-MARINE. — RIDES SOUS-MARINES (fig. 7 et 10). Sur cette côte plate, où la masse des apports s'oppose à l'établissement d'un profil d'équilibre, il se forme des rides sous-marines parallèles au rivage. En raison de la turbidité elles sont peu visibles de la côte et guère plus en nageant avec des lunettes de calfat. Il faut plonger et mesurer la profondeur pour les repérer. Avec la faible épaisseur de la lame d'eau, même chargée en trouble, la photographie aérienne aurait pu rendre compte des accidents du fond sous-marin comme si celle-ci était enlevée et le rivage aurait été à peine visible sur les épreuves, mais la mission n'ayant pas eu la topographie sous-marine comme but, le champ angulaire choisi pour l'objectif était trop

grand pour que ce résultat ait été atteint. On peut cependant deviner les rides dans leur développement intégral. L'irrégularité des tonalités dans les montages photographiques tient au fait que, par suite de phénomènes de réflexion, chaque photo est plus exposée sur son bord est (Pl. I).

A. Rivière [1949 a] attribue à la houle un rôle prépondérant dans la formation des rides sous-marines. Elles se produisent près du rivage à la limite de la zone de turbulence du ressac. Si elles

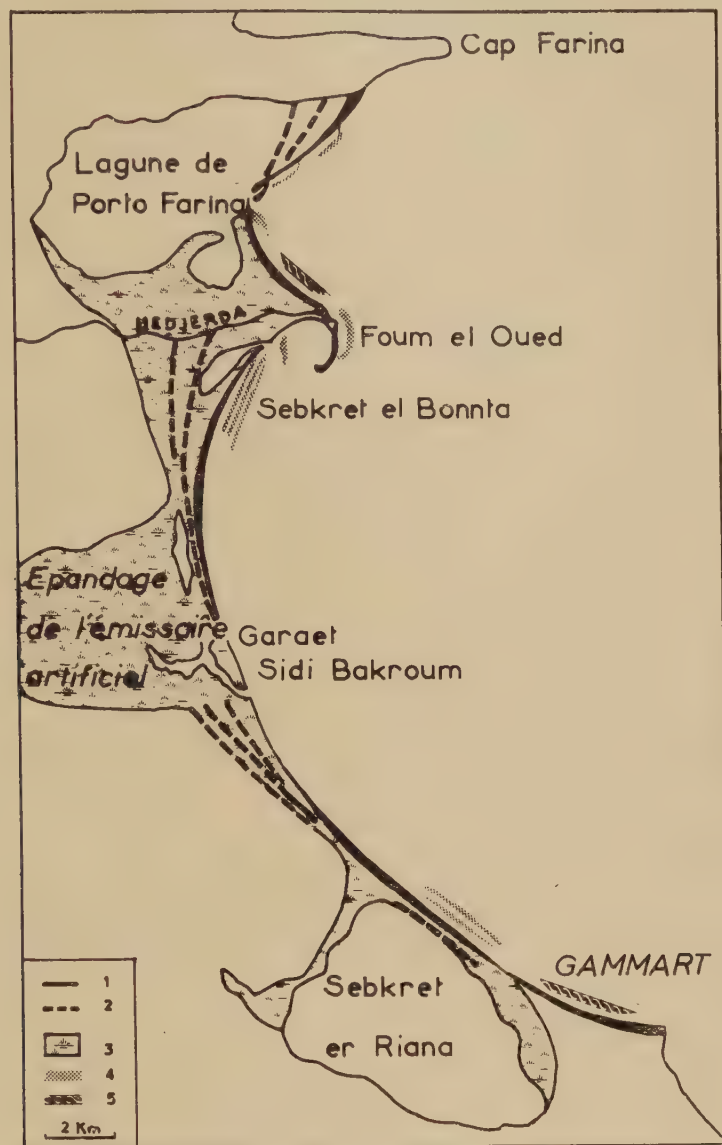


FIG. 7. — Littoral du delta de la Medjerda.

1 : cordons littoraux ; 2 : anciens cordons littoraux ; 3 : vasières ; 4 et 5 : rides sous-marines schématisées (4 : figures de transport ; 5 : figures d'accumulation).

s'accusent, elles peuvent faire déferler et créer une deuxième zone de ressac qui permettra l'établissement d'une autre ride au large de la précédente.

La pointe deltaïque de Foum El Oued délimite deux baies secondaires au fond de la baie principale ; on examinera d'abord la plus petite située au Nord. *El foum* signifie la bouche. Foum el Oued, la bouche de l'oued, désigne littéralement l'embouchure. A son extrémité nord, au large

de la flèche partant du cap Farina pour fermer la lagune, les rides sous-marines se détachent du rivage et s'allongent en cordons étroits étirés vers le S, longs d'environ 500 m, qui s'écartent progressivement du rivage parallèlement aux vagues, en sorte que la plage est hérissée d'apophyses parallèles orientées N-S, qui divergent de la rive infléchie vers l'W. Ceci est très visible sur la Pl. II. Quand elles émergent, elles reçoivent le vent du Nord, qui étant localement vent de terre, permet l'accumulation du sable arraché au littoral. Il est très classique de voir une côte s'engraisser par des processus semblables [Rivière, 1949 a ; Duboul-Razavet, 1949 b], mais avant d'admettre un engraissement effectif dans ce cas particulier, il convient d'examiner en détail le rivage sud de la baie secondaire.

Quand la plage tourne rejoindre l'embouchure, elle est exposée à recevoir le vent du Nord comme un vent de mer. Les rides sous-marines persistent mais changent de caractère. Elles s'interrompent sur une distance de 1 km et c'est précisément là que j'avais levé une coupe à la nage, pour trouver sur 200 m un fond en pente régulière de 0 à — 3 m. Sans la photo aérienne elles auraient échappé. Elles deviennent courtes et épaisses, la largeur atteint le quart de la longueur. A. Rivière [1949 b] remarque que les rides ont tendance à s'élargir et à s'aplatir quand la turbulence augmente, et l'a précisément observé sur le littoral tunisien. Comme la houle du large frappe de plein fouet, leur aspect n'a rien d'aberrant. Elles se terminent par des crochons épaissis ; au delta du Rhône M^{me} Duboul-Razavet [1949 b, 1951 c] signale également des crochons. Par suite de la présence de ceux-ci, elles s'intriquent les unes dans les autres comme un puzzle et finissent par s'accoler. Elles donnent alors naissance à de gros amas sableux, dont les formes et les solutions de continuité montrent la genèse à partir des rides. Ils semblent migrer vers le rivage et les plus anciens viennent s'y accoler et émergent.

Assez loin de la mer, les photos présentent des ombres qui permettent de distinguer le relief d'anciennes rides ayant subi une évolution dunaire plus ou moins accentuée (Pl. I et II).

Soulignons l'utilité des photos aériennes : seules elles peuvent rendre cette évolution visible, en autorisant une cartographie exacte, impossible autrement, de la plage et des fonds sous-marins. Quant à l'observation directe en avion, elle peut donner des idées générales mais elle manque de précision en raison de sa rapidité ¹.

Il peut paraître anormal d'observer un engraissement sur une plage exposée au vent. M^{me} Duboul-Razavet [1949 b] a observé dans le delta du Rhône, à la pointe de Beauduc, un phénomène analogue. La presqu'île de Beauduc est un promontoire s'avancant parallèlement à la côte, et séparé du rivage des Saintes-Maries, au N, par un petit golfe. Le mistral soufflant du N y alterne avec les vents du SE. Ces derniers ont un effet érosif sur la côte sud et remblaient la côte nord. Le mistral remblaie la côte sud, annulant l'effet du vent du SE, mais n'érode pas la côte nord car il lui apporte les sédiments arrachés aux Saintes-Maries par cheminement le long de la plage. De même ici les houles du N remblaient la partie du promontoire deltaïque de Foum El Oued qui leur est exposée, car elles y amènent par transfert littoral les sables arrachés 4 km au N à la côte de Porto Farina. Le sable est particulièrement fin et une partie est entraînée par le vent en suspension.

Cette plage est remarquable par l'accumulation des éléments flottants poussés par le vent. Parmi les Mollusques rejetés, les formes allongées et très légères, facilement entraînées, dominent presque exclusivement (*Arca*, *Scutella* aux coquilles fragiles...). Il y a aussi des tests de Crustacés, des Poissons morts ou des débris de leurs squelettes, parmi lesquels j'ai trouvé une vertèbre de Squal de 20 cm de large. Ces faits paraissent de nature à faciliter l'interprétation de certains niveaux des séries stratigraphiques, présentant des caractères paléontologiques similaires. En particulier l'abondance des coquilles de grande taille, légères, allongées, indiquerait une émergence et un cordon exposé au large.

A la lumière des faits décrits pour le rivage de Foum El Oued, il est plus facile d'interpréter les détails de la flèche qui s'est formée au S du cap Farina, avec ses rides allongées dans la direc-

1. Cl. Collet a souvent survolé le delta et m'a communiqué ses impressions.

tion des vents. Ceux-ci ont une incidence faible et, comme la côte n'est pas rectiligne mais présente une suite d'ondulation, elle est alternativement légèrement au vent et légèrement sous le vent. Les portions sous le vent montrent une érosion éolienne très nette et se terminent par un talus vertical de 0,50 m auquel fait suite une banquette de 2 m. Au niveau des vagues, la banquette est coupée par un nouveau talus de 0,40 m qui indique une érosion marine concourante. Au contraire, les portions au vent sont en cours de remblayage par la mer. Les rides sous-marines prolongent les promontoires en érosion et s'allongent au large des parties en cours de remblayage. A leur abri se dépose un sable très fin qui ne tarde pas à combler la « bêche » les séparant du rivage. On peut s'en rendre compte en interprétant la photo aérienne de la Pl. II. Alors que dans la zone d'érosion du bord nord-est le rivage recule jusqu'aux jardins, il s'écarte de ceux-ci dans la zone d'engraissement de la plage située à l'abri de la ride.

Les rides sous-marines tangent au rivage apparaissent donc comme des constructions sédimentaires mobiles, dont le déplacement est une forme de transfert littoral, ainsi qu'a pu le montrer récemment M^{lle} S. Verhnet [1953]. Les alternances d'érosion et de colmatage, en inversant les anses et les promontoires, remanient incessamment ce dispositif. Le même phénomène se produit à une plus grande échelle, quand le sable est transporté vers Foum El Oued. Ce régime est d'ailleurs général de Gammart à Porto Farina, la baie se trouve si envahie sous le matériel fin qui s'y déverse sans cesse, que l'ablation éolienne ne suffit pas à l'éliminer.

Au S de Foum El Oued, la baie secondaire méridionale est plus vaste et plus aplatie; on y retrouvera les mêmes caractères, mais moins accentués. Au N, dans la partie sous le vent, la photo indique trois ou quatre rides très minces dont la distance au rivage va jusqu'à 800 m. Mal discernables en raison de l'extrême turbidité, elles sont vraisemblablement en déplacement perpétuel. Une coupe effectuée à la nage a montré que la première, à 75 m du bord, était haute de 50 cm et déversée vers la terre; la deuxième, à 300 m du rivage, présentait la même hauteur, approchant la surface de 1,50 m. La faiblesse des fonds extrêmement plats, entraînant le déferlement de la houle à grande distance de la plage, explique sans doute cette disposition. Vers le S, les rides s'interrompent sur une quinzaine de kilomètres, puis en s'approchant du cap Gammart trois rides parallèles réapparaissent, la plus externe à 600 ou 700 m du bord paraît particulièrement accentuée. La côte de Gammart, orientée vers le N, s'accroît par l'accolement de rides épaisses et emboîtées, analogues à celles décrites à Foum El Oued.

VASIÈRES¹.—Si l'évolution du rivage traduit l'importance des apports sableux, la part principale de la sédimentation est constituée par les éléments fins qui forment l'essentiel du débit solide de la Medjerda. Actuellement il y a deux grandes vasières en voie d'atterrissement : la lagune de Porto Farina, qui reste le témoin d'une transgression marine et qui sera examinée plus loin, et le lagon d'eau dormante ouvert au S, constitué à l'abri du cordon littoral de Foum El Oued.

Le vent du Nord n'y produit guère d'érosion, vraisemblablement par suite de la présence de contre-courants compensateurs, car les berges de la Medjerda sans altitude abritent peu. La profondeur est très faible et la pente très douce. La photo aérienne montre clairement que les matériaux flottants s'accumulent vers le fond (Pl. I). La bordure ouest est sous influence des houles réfractées, elle est agitée et il ne peut s'y déposer que du sable. Elle paraît, d'autre part, soumise à des tourbillons prenant naissance à l'ouverture et décelables sur la photo. Il y a vraisemblablement conflit entre les mouvements giratoires du lagon et le ressac, ce qui expliquerait l'existence de la curieuse ride sous-marine qui s'étend en accent circonflexe à 500 m de la côte.

1. Voir sur la fig. 7 les relations des vasières avec les cordons littoraux.

Le long des bords nord et est, toute turbulence s'annule, car sur 100 ou 200 m la lame d'eau n'a pas 50 cm d'épaisseur. Il se dépose des vases. Les crochons qui proéminent sur la face interne du cordon de Foum El Oued forment ce que M^{me} Duboul-Razavet [1949 a] appelle en Camargue des « pièges à sédiments » ; ils retiennent les vases dans les criques qu'ils délimitent. Les rives est et nord sont en voie d'émersion rapide : au-delà du cordon littoral sableux, une banquette vaseuse, affleurant le niveau de l'eau, est le témoignage d'un gain récent sur le domaine maritime.

Le matériel sédimentaire est manifestement transporté sous forme de suspension. D'autres corps capables de flotter suivent le même itinéraire et en particulier des feuilles de *Posidonia ludensis*, Phanérogame des herbiers sous-marins à longues feuilles en lanières. Elles s'amassent sur les bords abrités est et nord, parfois sur plusieurs centaines de mètres et y constituent un feutrage épais de 30 à 50 cm en voie de putréfaction. C'est un milieu favorisant le développement d'une flore bactérienne abondante, les fermentations produisent des sulfures et s'accompagnent de l'odeur caractéristique de H₂S. La vase prend une teinte gris sombre ; par place, sa couleur très noire est bien visible sur les photos aériennes. La Sebkret el Bounta s'ouvre à l'entrée du lagon. Elle reçoit le matériel fin qui y pénètre avec les courants. L'entrée est recouverte de vase mouvante sous 50 cm d'eau, et il était impossible de la traverser en 1952.

L'existence de ce cordon littoral de sable grossier, auquel les coquilles confèrent un net caractère marin et sur le bord interne duquel se développe une sédimentation végétale demi-anaérobie liée à un complexe minéral de grande finesse granulométrique, permet de mieux comprendre la formation de certains bassins houillers littoraux. Soit, pour prendre un exemple, celui de Djerrada au Maroc, auquel s'est consacré B. Owodenko, où les veines sont séparées par de minces bancs gréseux ou de petites lentilles de calcaire à structure parfois « cone in cone » à *Spirifer*, *Anthracoceras*, etc... [Owodenko et Horon, 1952 a et b]. La manière classique d'interpréter cette stratigraphie consiste à supposer des transgressions et des régressions multiples et très rapides dont on imagine mal les causes. Après avoir abandonné l'eustatisme à petite échelle, on a pensé à des subsidences rythmiques, pour arriver avec A. Bersier [1949] à de simples variations de facteurs géographiques. L'étude que nous venons de faire montre que les deux milieux peuvent être juxtaposés et contemporains. Des déplacements de rivage de quelques mètres accompagnant une subsidence continue suffiraient à produire des empilements aussi différenciés que ceux de Djerrada.

DÉRIVATIONS PÉRILITTORALES. — Si le débit solide reste en grande partie confiné dans la baie, comme cela semble vraisemblablement être le cas, il devrait exonder rapidement les zones marines comprises entre Gammart et le cap Farina. La superficie de cette baie est d'environ 270 km². L'apport annuel, correspondant comme nous l'avons vu à une tranche de 10 cm pour 100 km², donnerait un engraissement des fonds de 3 cm par an, qui explique leur platitude. En outre, le retour vers la côte provoque une avancée du rivage, dont les repères ont permis de déterminer l'importance. L'embouchure est en transformation.

La première édition de la feuille Porto Farina au 50 000^e date de 1902. La fig. 8 A permet de comparer le tracé correspondant à celui de 1935 ; un paquet sablo-vaseux d'1 km² s'est amassé. La mission photographique aérienne de 1949 apporte de nouveaux contours, l'amas de 1935 s'est déplacé vers le S et transformé en une flèche étirée, dont l'extrémité distale s'adonne d'un crochon. Sa face interne est jalonnée de nœuds marquant les différents stades d'une croissance par paliers. M^{me} Duboul-Razavet [1949 b] observe la même chose à la pointe de Beauduc et montre qu'il s'agit d'un emboîtement de flèches élémentaires. La photo aérienne (Pl. I) décèle un élément en cours d'évolution encore submergé qui s'accroche au précédent en le bordant. En 1952, l'avancée s'était poursuivie et je l'ai mesurée sans précision par un levé d'itinéraire à la boussole. En même temps, de 1902 à 1935, le rivage sud de la presqu'île avait régressé. Ceci est dû à l'action du vent, qui entraîne les sédiments de la côte regardant au S pour les amasser sur celle regardant au N. Mais, de 1935 à 1949, le mouvement s'inverse grâce aux vasières atterrissant à l'abri de la flèche élaborée depuis l'embouchure.

Le mode d'avancée paraît donc élucidé dès les premières constatations. La côte progresse par cordons littoraux s'emboîtant successivement les uns dans les autres. Sous l'influence composée de la houle et des vents, les sables roulés par traction s'éloignent de l'embouchure vers le S et forment une ride allongée parallèle à la côte ; ce qui délimite une baie resserrée protégée de l'érosion, où s'accumule le matériel fin prédominant. L'histoire de cette évolution entre 1900 et 1950 permet de comprendre la morphologie de la zone littorale. La carte de la fig. 7 montre les relations entre les bandes sableuses et les vasières. Les sables sont d'anciens cordons littoraux émergés à partir de rides sous-marines et délimitent des lagunes allongées que les vases ont colmatées.

L'avancée d'une côte par cordons littoraux emboîtés séparant des vasières est classique. La pointe de Beauduc est formée ainsi ; M^{me} Duboul-Razavet [1951 a] y observe en plus des dunes allongées dans le lit du vent qui suivent les cordons ; ici le caractère vaseux prédominant s'oppose à l'évolution dunaire, sauf en quelques points vers Gammart. L'analyse granulométrique montrera le triage poussé qui caractérise la construction de la ride sous-marine et la persistance de ce caractère dans les anciennes plages. Il s'accompagne d'une dispersion dans les vasières abritées, dont les dépôts ont un caractère sensiblement plus évolué.

Toutefois la Medjerda n'est pas identique au Rhône. On retrouve la trace de trois flèches emboîtées au N de la lagune de Porto Farina, mais il n'y en a pas sur la rive gauche de la Medjerda qui n'est pas symétrique de la rive droite. Les observations faites sur le terrain à Porto Farina, les données que l'on peut tirer des éditions successives de la carte pour la bordure de la Sebket el Bounta, montrent des oscillations du rivage plutôt qu'un engraissement. Les rides sous-marines, dont la formation résulte d'un mécanisme de caractère très général [Rivière, 1949 a], n'accusent pas nécessairement un recul de la mer mais seulement l'évolution vers un profil d'équilibre. L'accroissement pourrait se produire selon ce mécanisme loin de la Medjerda, à Gammart. Mais à l'embouchure il n'en est pas ainsi, en raison de l'amas sableux déposé d'abord en mer. Aux bouches du grand Rhône [Duboul-Razavet, 1951 c], l'avancée se traduit par l'apparition d'îlots triangulaires successifs, qui n'existent pas à Foug El Oued. Tout se passe comme s'il y avait deux phénomènes superposés, d'une part une avancée rectiligne de l'embouchure perpendiculairement au rivage, d'autre part, un transport vers le S. Dans cette nouvelle façon de voir, les rides sous-marines près de Foug El Oued ne supposent pas une tendance à l'émersion, mais sont simplement des structures plus ou moins bien stabilisées laissées en arrière par la dérive N-S.

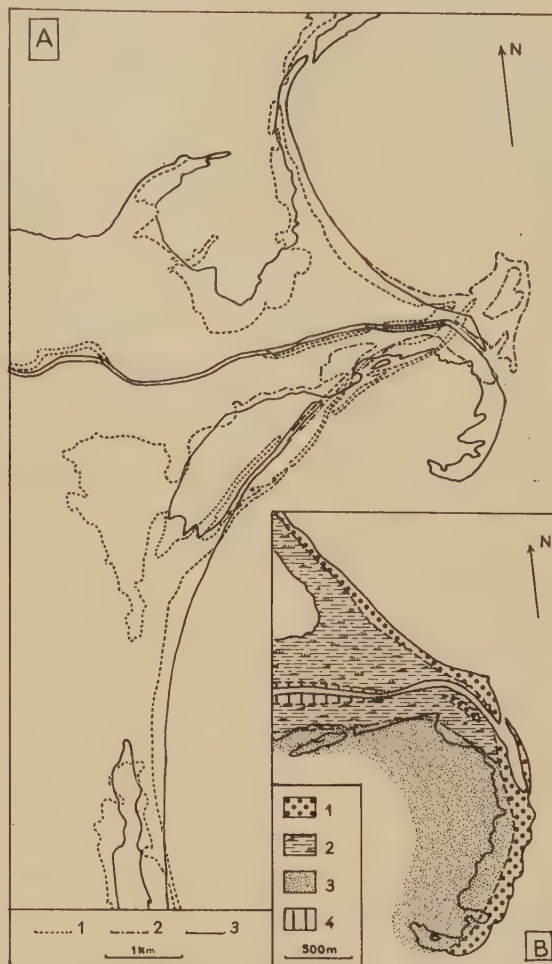


FIG. 8. — Embouchure de la Medjerda.

A : Évolution historique. 1 : levé de l'I. G. N. au 50 000^e de 1902 ; 2 : révision de 1935 ; 3 : photos aériennes de 1948-1949.

B : aspect lithologique. 1 : sable ; 2 : vase ; 3 : vase en fermentation organique avec des dépôts d'Algues ; 4 : limons fluviaux.

Il existe un exemple de delta construit par un fleuve, qui s'éloigne en mer normalement à la côte : le delta du Mississippi étudié par J. R. Russel. Le Mississippi élabore des levées sous-marines le conduisant au large, elles se remblaient et émergent pour établir des digues. Aux changements de direction, des crevasses entaillent les berges et provoquent des épandages latéraux, où se sédimente du matériel fin. Les vasières de la Medjerda comme la Sebkret el Bounta se sont peut-être formées ainsi et non par le mécanisme plus classique de sédimentation à l'abri des flèches sableuses.

Les changements de lit donnent au delta un aspect foliacé. J. R. Russel [1936, p. 50, fig. 6 et p. 29, fig. 4 au 50 000^e env.] a publié des cartes de détail (par exemple Bayou-la-Loutre). De chaque côté des anciens lits, les crevasses figurent des ramifications, que Russel [J. R. et R. D. Russel, 1939] compare à celles des nervures d'une feuille. Les anciens lits de la Medjerda, grossièrement parallèles, évoquent également les nervures d'une feuille palmée, qui se raccorderaient à Djedeïda (fig. 10). Si cette disposition est beaucoup moins nette que celle du Mississippi, ce pourrait être à cause des différences hydrographiques. Le bas Mississippi est semé de lacs allongés dans les anciens lits (région de Garden Island, de Saint-Bernard Parish), l'empâtement de la Medjerda viendrait du débit solide proportionnellement très élevé.

Le type granulométrique du Mississippi est particulier. C'est le courant sous-marin qui dépose les levées : dans l'axe où il est vif il ne laisse que du sable, sur les bords s'accumulent les fins. Les berges émergées sont formées de silt grossier ou de sable fin, les fonds de lits sont tapissés de sable grossier, plus grossiers sur les bords. La comparaison avec la Medjerda s'arrête là. Le débit de la Medjerda très irrégulier est faible, sa pente nulle et le courant en mer ne peut qu'être dérisoire, et incapable de s'opposer aux actions maritimes qui empêchent la construction de levées s'éloignant de la côte. D'ailleurs les marées jouent un rôle dans leur émergence et la Méditerranée en est dépourvue. Les sédiments prélevés au turbidisonde ou à la benne par Cl. Collet sont sableux sur les berges et limoneux au fond du lit, contrairement à ce qui s'observe dans le delta du Mississippi. Les anciens lits à sec ne présentent aucune variation granulométrique transversale. J. R. Russel [1942] a voulu étendre au Rhône les observations qu'il avait dégagées de l'étude du Mississippi, mais il connaissait insuffisamment la région, et M^{me} Duboul-Razavet [1951 c] a prouvé que le delta du Rhône s'était constitué par formation de cordons littoraux successifs parallèles à la côte.

La fig. 8 B est une carte lithologique de l'embouchure de la Medjerda. Les limons alluviaux qui couvrent la plaine dans laquelle coule le fleuve se sont déposés pendant les crues. Mais à l'extrémité aval, quand les berges ne sont plus élevées que de quelques centimètres en étiage et que les crues s'épandent en mer, ces limons cèdent la place à des vases marines qui se déposent à l'abri du cordon sableux de Foum El Oued. Celui-ci établi en mer et à peine relié à la côte joue un rôle essentiel dans l'évolution sédimentologique de la région. La frontière est parfaitement nette entre les sédiments marins classés et le limon fluviatile non trié.

A l'embouchure, des vases en fermentation organique se déposent au fond du lit. Elles sont attaquées par les houles et, étant relativement compactes, elles se débitent en galets roulés et percés par les Lithophages. La mer les entraîne et les rejette sur les plages de sable. Il y a là une origine possible de certains grès à galets d'argile, tels que ceux de l'Oligocène de Kroumirie [Gottis, 1953] ou ceux du Trias de Madagascar.

M. Pisani a suivi les transformations d'une autre passe, celle de la lagune de Porto Farina, plus modeste et par conséquent d'étude plus facile. Chaque fois qu'il creusait un chenal celui-ci se déplaçait vers le S de plusieurs centaines de mètres en quelques mois, pour disparaître en atteignant l'inflexion qui rejoint Foum El Oued (fig. 9). On a vu que, sous l'effet du vent du Nord, la mer érodait la plage septentrionale et remblayait la plage méridionale. Dans ces condi-

tions on aurait pu s'attendre à un déplacement de l'embouchure vers le N, à l'opposé de celui qui se produit réellement. J'ai pu avoir l'explication du phénomène en mars 1952. Il résulte de l'émergence d'une ride sous-marine étirée vers le S, qui rejette la passe dans cette direction à travers les sables fins nouvellement amassés et à peine stables. Devant la Medjerda au contraire l'importance du courant de chasse entretient l'ouverture que la ride sous-marine ne peut plus barrer. En fait, il existe une levée sous-marine comparable à celles du Mississippi, mais une seule, elle est engendrée par les actions littorales au lieu de l'être par le fleuve et elle suit la côte. Sur

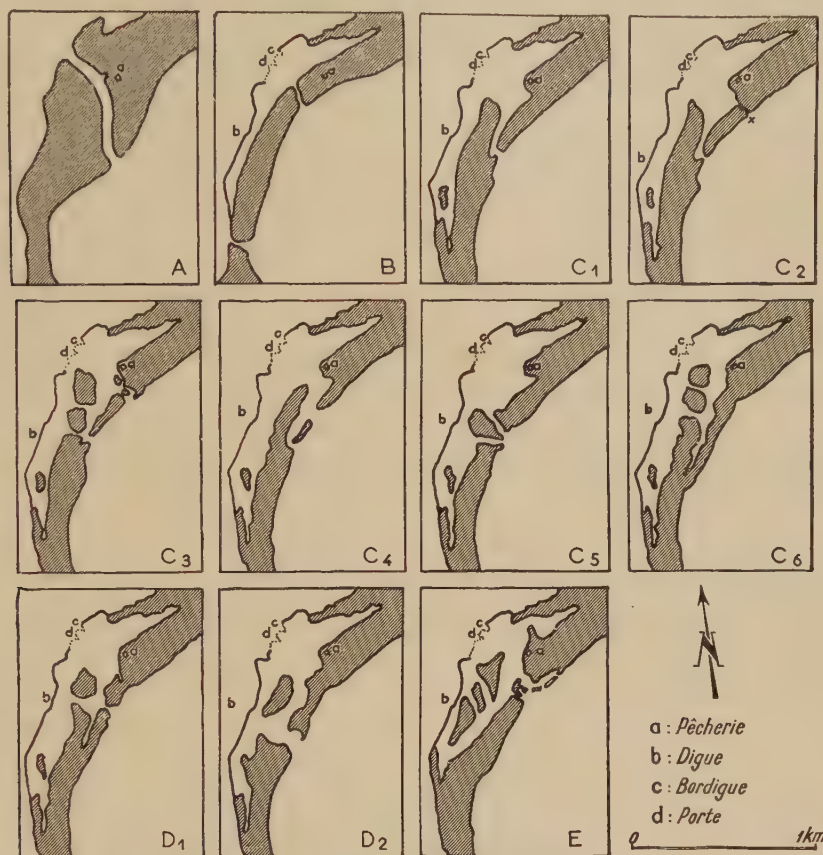


FIG. 9. — Évolution de la passe de Porto Farina d'après des observations effectuées à la pêcherie Pisani.

A : 1935, édition de la carte au 50 000^e en usage en 1955 (contours imprécis).

B : 1940, deux passes.

C : de 1947 à 1949. 1 (23-10-1947) : passe unique déportée vers le S ; 2 (23-11-1947) : creusement d'un nouveau chenal (x) ; 3 (6-1-1948) : évolution du chenal ; 4 (18-2-1948) : déplacement vers le S ; 5 (2-3-1948) : les deux passes se rejoignent, la profondeur diminue ; 6 (1-2-1949) : fermeture complète.

D : le chenal de 1949. 1 (1-3-1949) : creusement d'un chenal ; 2 (2-6-1949) : perte de profondeur et déplacement vers le S.

E : mars 1953, fermeture d'un chenal établi par les riverains.

la photo de 1949, on voit les vagues qui brisent sur la levée externe, le lit de la Medjerda se continuait entre elle et la côte sur 500 m en direction du S (Pl. I).

Dans la partie occidentale du delta du Rhône, A. Rivière et M^{me} Duboul-Razavet [1951] observent des embouchures raccordées dissymétriquement à une ride, qui élaborent un bras périlittoral ; ils pensent que certaines diramations compliquant les bras morts se sont formées de cette manière. C'est la morphologie même de la Medjerda : en 1952, ses bouches rappellent une des figures publiées par A. Rivière et M^{me} Duboul-Razavet ; la ride en cours d'émergence n'a pas encore parfaitement rejoint la côte (fig. 8B). Les lits dérivent dans le lit du vent ; ils

expliquent que cela se produit lorsque le vent dominant vient du continent et favorise l'engraissement de la levée périlittorale. Cet aspect dynamique de l'évolution se retrouve dans le cas de la Medjerda. Les vents du NW favorisent l'engraissement parce qu'ils ont d'abord arraché du matériel à la côte de Porto Farina, mais aussi parce qu'ils se présentent dans ce secteur avec le caractère de vents continentaux. La Medjerda subit en définitive une dérivation périlittorale avec tous les caractères définis par A. Rivière et M^{me} Duboul-Razavet, mais le phénomène est peut-être encore plus net que dans le cas du delta du Rhône, puisqu'il n'y a pas à tenir compte des actions contraires de vents soufflant de deux secteurs opposés.

Découvertes dans les bras morts du Rhône, ces dérivations périlittorales caractérisent pour ces auteurs les cours d'eau secondaires. Avec son débit irrégulier et minime pendant les interminables étiages estivaux, la Medjerda ne parvient pas à entamer la ride sous-marine qui tend à barrer la passe et rentre dans cette catégorie. Son action n'est guère plus vigoureuse que les chasses produites par le vent à travers la lagune de Porto Farina. D'autant plus que ses périodes de réveil hivernal correspondent à une activité accrue des vents du secteur NW, tandis qu'en été les brises de terre ont loisir de parachever la fermeture. L'apport solide est surtout constitué par des suspensions fines qui s'écartent immédiatement de la côte sans influencer l'évolution des plages formées par la partie grossière du sédiment. Par contre, en restant dans la baie, elles entraînent son comblement rapide. L'inflexion périlittorale explique d'une manière satisfaisante la formation d'une presqu'île pratiquement détachée de la côte. Bientôt une bifurcation semble devoir se former et redonner de la pente au cours terminal en raccourcissant l'arc infléchi selon sa corde : elle déportera l'embouchure à la fois vers le large et vers le S. Deux anciennes bifurcations sont d'ailleurs visibles en amont et au N (lits 7 et 8, fig. 10).

Après l'avoir remblayée, le delta commence une avancée au large de la baie qui le protège et les inflexions périlittorales successives vont rejeter l'embouchure vers le S. Par chance l'étude s'est trouvée être contemporaine de l'élaboration d'une dérivation, ce qui a permis de saisir sur le vif les mécanismes de l'évolution deltaïque, car les inflexions caractéristiques ne sont que temporaires, érodées à l'extérieur et remblayées dans leur concavité. Ce qui subsiste, c'est la diramation. Les côtes en régression de la Tunisie orientale, où le débit solide barre l'embouchure des oueds et les oblige à s'évaporer avant d'atteindre la mer, apparaissent à la lumière de ces faits comme correspondant à un type extrême de ces mécanismes particuliers d'évolution deltaïque.

ASPECT D'ENSEMBLE. — Combinant une figure de bras mort avec une évolution active, le delta de la Medjerda a un aspect spécial qui traduit à la fois les caractères du fleuve et les facteurs dynamiques qui règnent au littoral. Le faible débit fait que l'influence fluviale s'interrompt dès la côte et les phénomènes sont dominés par l'énorme importance relative du débit solide. Comme le montrera l'étude ultérieure de la granulométrie, la constance du régime marin conduit à un triage très strict. Modelés par le vent et la houle, les sables déterminent la morphologie du delta et en constituent l'ossature. L'emplacement des vasières est subordonné aux cordons littoraux, mais leur superficie est immense par rapport à celle des formations sableuses, par suite de la prédominance des phases fines dans le débit solide. L'espace en arrière du cordon littoral le plus récent n'est d'ailleurs pas encore comblé (fig. 10).

III. Évolution géologique du delta.

Évolution historique (anciens lits de la Medjerda, mer d'Utique et lagune résiduelle de Porto Farina, comblement de la mer d'Utique et alluvionnement continental). — Les cycles (données de sondages, récurrences marines d'Utique et de Djedeïda et cyclothèmes supérieurs, exhaussements, causes du rythme cyclique). — Subsidence cyclothématique.

ÉVOLUTION HISTORIQUE. — L'évolution actuelle du delta est une progression à la fois vers le large et vers le S. En rétablissant les événements survenus dans la période historique, on assiste à une marche complètement différente.

La partie distale formée de vasières et de cordons littoraux emboîtés s'interrompt à 1 km du rivage pour céder la place à des limons fluviatiles rougeâtres ou grisâtres homogènes et remplis de Pulmonés. M^{me} Duboul-Razavet avait pensé que les anciens cordons littoraux pouvaient

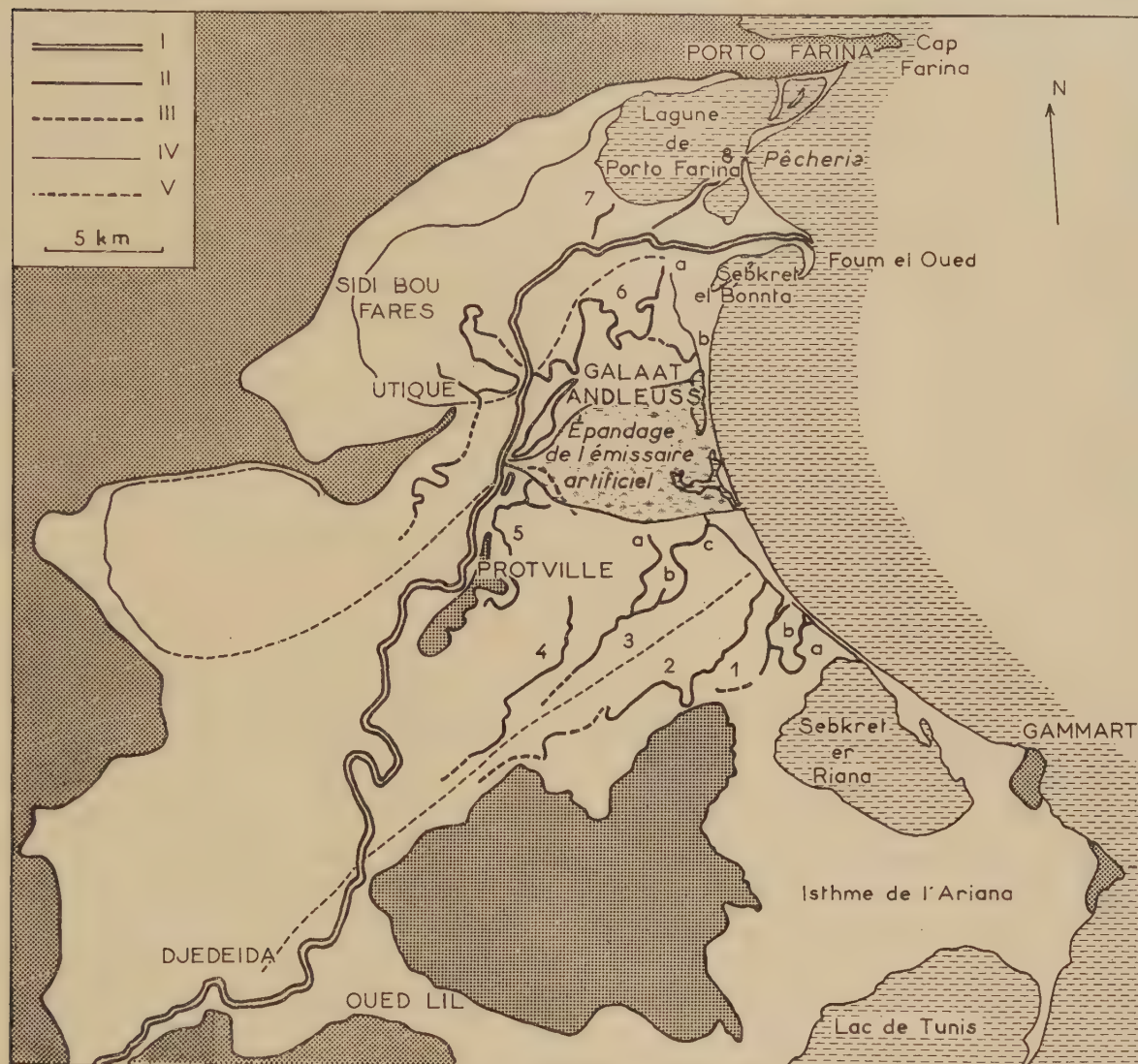


FIG. 10. — Delta de la Medjerda interprété d'après les photos aériennes.

I : lit fonctionnel ; II : lits résiduels ; III : lits résiduels supposés ; IV : anciens rivages ; V : anciens rivages supposés.

s'enfouir en arrière par subsidence et m'avait conseillé de procéder à quelques sondages à la tarière pour essayer de les retrouver ; mais l'avancée du delta est rapide vis-à-vis de la subsidence. Sur le terrain, le passage à la formation continentale paraît graduel et on peut lui supposer une cause climatique. En arrière de la côte, les pluies auraient lavé les terres salées et le sol fertile se serait établi par échange de bases. Par ailleurs, les phénomènes climatiques suffiraient à homogénéiser les sables et les vases classés par la mer et à rétablir un mélange analogue à l'apport

fluviale. En effet, les vents faibles de l'été déplacent la phase argileuse réduite à l'état de poussières par la dessiccation, mais n'entraînent guère les sables ; en hiver, les argiles sont cohérentes et les vents plus violents agissent seulement sur les sables ; il pourrait en résulter en quelques années une homogénéisation superficielle. Cette explication semble valable localement, en particulier autour de la lagune de Porto Farina. Mais ailleurs, l'examen des photos aériennes s'oppose à cette interprétation. Il n'y a pas en effet de passage progressif, mais un ancien rivage érodé encore très net le long duquel se sont accolées les formations deltaïques. Il y a donc eu deux phases successives : l'accroissement deltaïque moderne se superpose à une évolution continentale plus ancienne.

Les limons continentaux ont en effet comblé une mer qui s'enfonçait jusque vers Djedeïda. L'existence de cette mer est une notion assez intuitive généralement répandue en Tunisie. Le traité de Géographie historique de Tissot [1884-1888] en parle, et moins anciennement Ch. de Monchicourt [1929].

La plaine est basse avec des dépressions plates de 50 à 100 km², celle d'Utique a 5 m d'altitude, celle de la Garaet El Mabtouha 7 à 8 m. Des marais d'aspect maritime y subsistent. Un bras de mer a dû s'enfoncer jusqu'à Djedeïda au fond de la baie triangulaire limitant le delta (fig. 10).

C'est également une notion intuitive et classique que la mer a reculé très rapidement vers le N. L'histoire romaine est contemporaine de la période terminale de cette phase, sans apporter une moisson de renseignements comparable à celle qui a permis de suivre de siècle en siècle la fermeture de la lagune de Tunis¹. Le port phénicien d'Utique est situé aujourd'hui à 11 km à l'intérieur des terres. Il fonctionnait encore au II^e siècle ; Polybe raconte comment deux consuls romains s'enfuirent d'Utique en barque pour aborder à la presqu'île de Castra Cornelianæ, aujourd'hui Galaat Andleuss.

ANCIENS LITS DE LA MEDJERDA. — D'anciens lits de la Medjerda sont visibles ; la route de Tunis à Bizerte traverse certains d'entre eux sur des ponceaux, d'autres figurent sur la carte au 50 000^e. Le capitaine Bernard les a suivis en 1912, et décrit des bifurcations en « Y ». S'appuyant sur leur morphologie, sur la présence de quelques vestiges archéologiques et sur les textes anciens, se référant à la Géographie historique de Tissot, il a rédigé une monographie [1912] où il reconstituait les anciens rivages en liaison avec les lits et précisé les paliers de la régression. L'amiral Barjot [1952] a repris cette étude. A mon tour, j'ai utilisé les photos aériennes sur lesquelles j'ai retrouvé d'anciens lits qui échappent à l'observation à terre, rendue difficile par l'horizontalité qui s'oppose aux vues d'ensemble. Ils sont numérotés sur la carte de la fig. 10, dressée d'après les photos. Les plus mal conservés et par conséquent les plus anciens sont au S. Du S vers le N, on relève :

Groupe 1 : découvert sur la photo et retrouvé ensuite par places.

Groupe 2 : une dépression vaguement marécageuse sans traces de berges.

Groupe 3 : tracé découvert sur la photo. Les fossés se suivent sur le terrain, mais la carte topographique est mal faite et n'aurait que difficilement permis de les orienter.

Groupes 4 et 5 : très bien conservés, fossé à fond plat de 1 à 2 m et berges aux talus arrondis.

Groupe 6 : des vestiges de méandres subactuels. Secteur nord : visibles seulement sur la photo aérienne (sans doute éphémères) ; secteur intermédiaire : aussi accusé que le lit fonctionnel (sur la carte au 200 000^e une boucle est encore empruntée par les eaux) ; secteur distal du SE : partie *a* identique au lit fonctionnel ; partie *b* retrouvée sur la photo aérienne.

1. Comme pour le lac de Tunis, M. Saumagne, Administrateur du Gouvernement tunisien et archéologue érudit, m'a aidé.

La Medjerda a donc progressé du S vers le N. Si les vents dominants soufflent du N, c'est parce qu'ils viennent de la Méditerranée ; leur direction influencée par l'orographie n'a pu varier. Or la dérive d'un fleuve contre le vent semble *a priori* anormale. Elle ne peut s'expliquer que par un ensemble de conditions très particulières que nous allons chercher à préciser.

Nous avons vu que le cours actuel se déporte régulièrement vers le S par inflexions périlittorales depuis les lits 7 et 8 jusqu'à celui de Fom El Oued. L'ancien lit 6 *a*, encore très bien conservé, émet un embranchement fugitif 6 *b*, déporté identiquement vers le S, qui laisse supposer la même dérivation périlittorale. La même chose se voit sur les extrémités du lit 5, le 3 passe au 3 *b* puis au 3 *c* ; ce sont les « Y » du capitaine Bernard. Les groupes 1 et 2 se particularisent.

A leurs embouchures les anciennes Medjerda reviennent donc du N vers le S comme celles d'aujourd'hui, et rencontraient donc des conditions comparables. Pourtant elles se succèdent du S vers le N. Ceci ne peut s'expliquer que parce que le comblement progressif à partir de son sommet de la profonde baie triangulaire enfermant le delta entraînait en définitive la migration vers le N de l'ensemble de leur cours inférieur. La marche des phénomènes semble avoir été chaque fois la suivante :

La Medjerda débouche sur la plage au fond du golfe. Elle alluvionne contre le vent, il s'établit une déviation périlittorale qui infléchit le cours et le retourne vers le S. Alors la pente devient insuffisante, le fleuve se perd en méandres, tels ceux du groupe 6 ; le débit solide ne parvient plus à s'évacuer et colmate, un méandre perce un nouveau lit en amont de l'embouchure morte au N et à l'W du précédent. Ainsi s'explique la migration vers le N du cours inférieur, malgré une tendance répétée de sa partie terminale à s'infléchir au S, et ceci simplement par le jeu des facteurs géographiques, maritimes et fluviaux, que nous connaissons, et en les supposant toujours invariants.

MER D'UTIQUE ET LAGUNE RÉSIDUELLE DE PORTO FARINA. — M'en tenant à cette interprétation, j'ai prolongé les fragments de lits observés et reconstitués d'anciens rivages sur la carte de la fig. 10. Des portions de ces rivages sont observables : la côte érodée le long de laquelle s'établit le régime deltaïque moderne, retrouvée sur photos ; le bord lagunaire au fond de la crique de la Garaet El Mabtouha. C'est la dépression ou mer d'Utique qui a été la dernière à se combler, et qui est demeurée la plus facilement visible. Son rivage est encore très discernable de la route de Bizerte, là où celle-ci entreprend l'ascension du Djebel Kechabta. Cette « mer d'Utique » forme une surface parfaitement plane où les sels ont été lavés. Elle est colonisée et les eaux douces la rendent paludéenne ; une société appelée « Domaines d'Utique » l'exploite.

Les jardins disposés le long de la route de Porto Farina ont des puits, qui traversent fréquemment les vases marines bleutées, truffées de coquilles. M. Arnould a déterminé :

LAMELLIBRANCHES :

Spondylus gaederopus L.
Barbatia barbata L.
Arca noe L.
Anomya ephippium L.
Ostrea sp.
Eastonia rugosa CHEMNITZ
Cardium paucicostatum SOW.

Dosinia lupinus L.
Venus casina L.
Solenocurtus antiquatus PULTENEY
Tellina nitida POLI
Chama gryphoides L.
Chlamys varia L.
Mytilus galloprovincialis LMK

GASTÉROPODES :

Aporrhais pes-pellicani L.
Murex brandaris L.

M. trunculus L.
Vermetus arenarius L.

SCAPHOPODES : *Dentalium vulgare* L.

C'est une faune très marquée au point de vue écologique. Les genres *Spondylus*, *Cardium*, *Dosinia*, *Tellina*, *Mytilus*, *Murex*, *Vermetus*, *Dentalium*, sont cités par Pallary [1912] dans l'ancienne lagune de Tunis, celle qui ouvrait encore sur la mer et dans laquelle il n'y avait pas de déficience en oxygène. Les *Vermetus* et *Spondylus gaederopus* vivent associés aux Éponges dans des plans d'eau sans profondeur, riches en troubles. Un Hexacoralliaire dont les colonies forment des récifs fragiles, *Cladocora cespitosa* L., déterminé par M^{me} Heldt mérite une mention spéciale. Montanaro [1920] en donne une description, ils sont irrégulièrement répartis, mais un puits près de Sidi Bou Fares a été foncé dans un récif et les a découverts ; les déblais formés de ces tubes sont assez curieux. Ce Polypier est écologiquement convergent avec un Serpulien d'eau saumâtre, *Mercierella enigmatica* FAUVEL, vivant dans l'actuelle lagune de Tunis [Heldt, 1948]. De même que les récifs à *Mercierella* abritent un peuplement, les *Cladocora* portent des Bryozoaires et des petites Huîtres. La similitude se trouve encore renforcée, car des sondages, forés à travers les anciennes vases déposées dans la lagune de Tunis quand

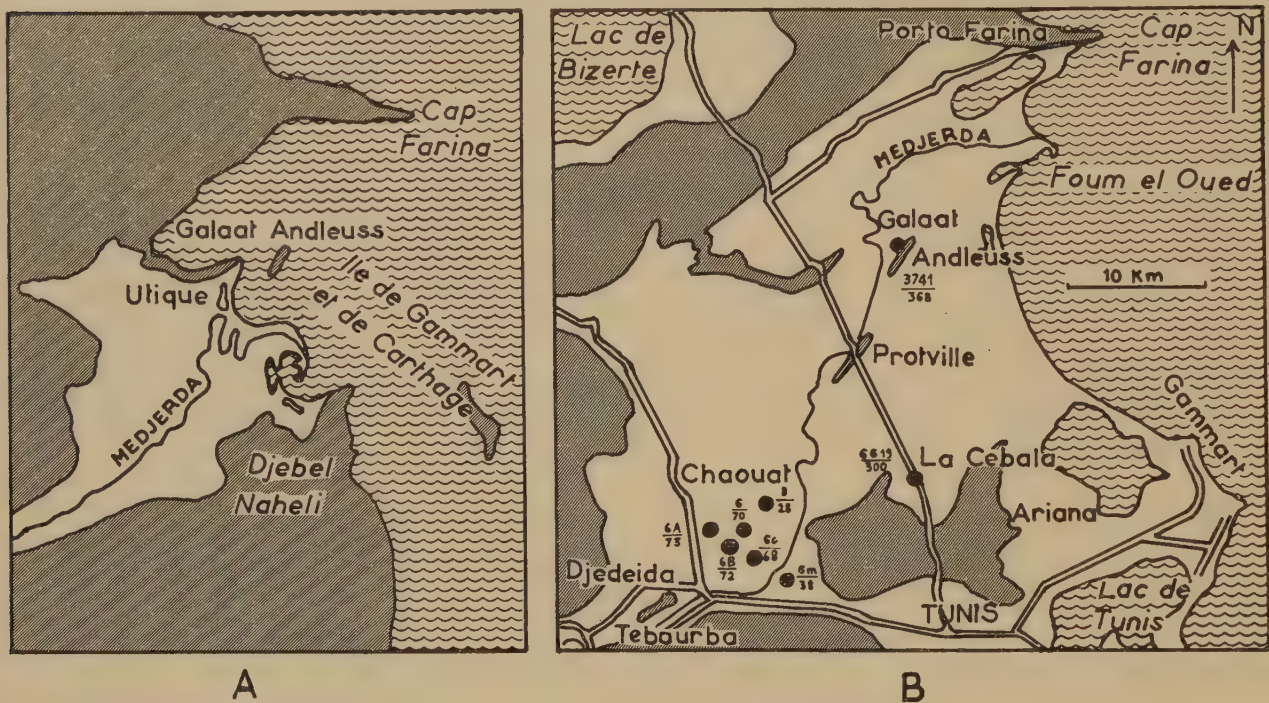


FIG. 11. — Baie et plaine d'Utique.

A : schéma du comblement du S vers le N de la baie d'Utique. — B : carte des sondages de la plaine d'Utique.

Chaque sondage est accompagné de deux chiffres : celui du numérateur étant un numéro d'ordre ; celui du dénominateur indiquant la profondeur mesurée en mètres.

la mer y accédait, ont mis à jour *Cladocora*. *Mercierella* l'aurait remplacé postérieurement à la fermeture. Le caractère de la mer d'Utique, lagune ouverte et sans profondeur, est donc nettement marqué et son atterrissement a dû se terminer au niveau zéro.

Ces puits sont au voisinage du lieu dit Sidi Bou Fares, dont l'emplacement est précisé fig. 10.

La mer d'Utique était une mer ouverte sur le large. A l'époque de l'invasion romaine elle s'est progressivement restreinte à la lagune de Porto Farina. Tite-Live raconte que la flotte de Scipion, après avoir navigué en vue du cap « Mercure », a fait rame vers le « Promontoire d'Apollon ». Gsell [1918], dans le t. III de son « Histoire ancienne de l'Afrique du Nord » identifie le cap Mercure à l'actuel cap Bon et le Promontoire d'Apollon ou « beau promontoire » au cap Farina. Une période s'écoule sans documents. Au XVIII^e siècle, la surface est diminuée et les flèches sont élaborées. Porto Farina était de ces ports abrités au fond d'une lagune, comme Venise, par exemple, que l'insécurité de la Méditerranée faisait affectionner. Un bey l'aménage en bâtissant la darse

que l'on trouve actuellement, mais cette installation portuaire n'a jamais été utilisée car le tirant d'eau a diminué dès l'achèvement [de Monchicourt, 1929]. L'édition de la carte marine révisée en 1933 indique des profondeurs de 0,50 à 1,30 m.

Au cours de cette histoire, l'évolution biologique a suivi celle du lac de Tunis ; la flore prolifère, la faune lui est subordonnée pour sa nourriture et son oxygène. Rejetés sur les plages, on trouve surtout *Cardium edule* L., également *Pallusdestrina*, *Piranella*, *Syndesmia* ; une espèce d'*Ostrea* de grande taille abondait mais est en voie d'extinction.

Les flèches construites à partir des embouchures en inflexion périlittorale ont dû fragmenter la mer d'Utique en compartiments successifs. Après l'établissement de la flèche partant du cap Farina, elle n'a plus été qu'une vasière. Dans la phase terminale, la limite d'émersion des vases est en liaison avec la recherche d'un ultime profil d'équilibre et est sujette à des variations que nous retrouverons dans le lac de Tunis. En Camargue, M^{me} Duboul-Razavet [1951 b] remarque que les étangs se colmatent à mesure qu'ils s'agrandissent à la suite de l'érosion de leurs berges. Ici ce sont les courants de chasse engendrés par la Medjerda qui ont entretenu l'érosion. La tendance actuelle au déport du fleuve vers Fom El Oued a été artificiellement favorisée quand on a procédé au drainage des domaines d'Utique. La disparition de cette cause secondaire d'érosion a permis l'évolution d'un profil d'équilibre plus élevé. La conclusion concernant la phase terminale de cette évolution est donnée par M^{me} Bellair-Baudier et P. Bellair [1951].

Puisque les sédiments qui viennent du large ferment la passe qui leur donne accès plus vite qu'ils n'atterrissent le fond, la lagune de Porto Farina persistera sans doute comme l'ultime témoin de l'ancienne histoire marine.

COMBLEMENT DE LA MER D'UTIQUE ET ALLUVIONNEMENT CONTINENTAL. — Dans les régions émergées les plus basses, la transformation des vases marines en limon par échange de bases et malaxage éolien est fréquente, mais l'évolution du profil d'équilibre se poursuit, et trois facteurs ont pour effet de rendre possible une sédimentation exclusivement continentale. Les ravinements torrentiels qui érodent les versants meubles des collines alluvionnent la plaine, en même temps qu'évoluent leurs profils longitudinaux. La migration des méandres de la Medjerda répartit les dépôts qu'elle laisse le long de ses berges. Enfin, pendant les hautes eaux, les crues peuvent s'évader du lit et s'épandre en laissant à chaque fois quelques décimètres de limons. L'émissaire, régularisé par les ingénieurs chargés de l'aménagement de la basse vallée, en apporte un exemple actuel. Il a déjà couvert de grands champs d'épandage et l'on peut y voir des limons fluviaux accompagnés d'une flore normale, déposés sur des terres encore salées à végétation halophile.

L'ultime portion remblayée de la mer d'Utique apparaît avec une surface parfaitement plane, dessalée et à 2 m d'altitude, bordée de talus déjà modelés par le ruissellement.

Le paysage diffère de celui de Camargue où il s'établit des dunes. Leur absence provient de la rareté du sable. Par contre, il rappelle un peu celui de la Mitidja. Visitant, sous la conduite du Dr Balozet, la ferme expérimentale de l'Institut Pasteur d'Alger installée dans les dernières parcelles insalubres, j'ai pu observer les couches successives de limons, laissés par le débordement d'un petit oued canalisé, et retenus dans des barrages. Ces dépôts ont achevé le comblement des marais. Ils présentent des alternances de strates sableuses et fines correspondant respectivement : les premières aux têtes de crues et les secondes aux phases terminales de chacun des épisodes.

Au cours de cette histoire les facteurs dynamiques sont restés invariants. Procédant avec sa démarche particulière qui entraîne l'extrémité distale à bifurquer d'une déviation périlittorale à la suivante, la Medjerda a d'abord comblé du S au N la baie qu'elle trouvait devant elle. Maintenant qu'elle est parvenue à la limite extrême de la baie à proximité de l'alignement des caps

Gammart et Farina, elle se prépare à lancer en mer un delta, qui appuiera ses bases sur ces deux assises rocheuses en s'infléchissant vers le Sud.

LES CYCLES. — Nous avons donc deux phénomènes différents et successifs : le comblement d'une baie profonde s'effectuant du S vers le N, puis une avancée deltaïque vers le large infléchie au S. Ils paraissent former un cycle unique, qui aurait débuté avec l'arrivée de la Medjerda dans le bassin d'Utique après la fermeture de la vallée de Tunis. Elle aurait alors vu s'ouvrir devant elle une mer libre, à laquelle elle aurait accédé en franchissant par exemple, une barrière dunaire. En réalité, cette paléogéographie simpliste ne correspond pas aux faits observés. Elle explique certes la lagune de Porto Farina, mais pas la Sebkret Er Riana, ni la disposition des anciens lits 1 et 2. Elle est démentie par les sondages.

DONNÉES DES SONDAGES. — Les sondages ont chacun leur dossier classé dans les archives de la Direction des travaux publics de Tunisie et portent un numéro d'ordre. Le détail et les coupes sont donnés ci-dessous, une carte précise les emplacements (fig. 11 B).

SONDAGES PROFONDS. — *Sondage n° 6619 de la Cébala.* Altitude 9 m. C'est une reconnaissance effectuée en 1950 par un Core-Drill Sullivan 200 du service spécial des sondages de la Direction des travaux publics. Je n'ai pas pu examiner les « cuttings ». La coupe est celle du sondeur.

de	0	à	7	m — argile compacte sableuse	=	7	m
	7	à	12	— « marne » (sic) ¹	=	5	
	12	à	20	— sable jaune	=	8	
	20	à	34	— marne bleue ¹	=	14	
	34	à	50	— argile tendre jaune	=	16	
	50	à	61	— argile jaune compacte avec une passée gréseuse	=	11	
	61	à	70	— sable avec tuf	=	9	
	70	à	92, 50	— argile compacte jaune	=	22, 50	
	92, 50	à	101, 50	— argile tendre et sable	=	9	
	101, 50	à	104, 50	— argile compacte	=	3	
	104, 5	à	110	— sable et galets	=	5, 50	
	110	à	118	— argile compacte	=	8	
	118	à	134	— argile tendre	=	16	
	134	à	136	— sable et galets	=	2	
	136	à	141	— argile avec passée gréseuses	=	5	
	141	à	175	— argile compacte jaune	=	34	
	175	à	198	— alternances argiles et sables	=	23	
	198	à	204	— sable avec grains de calcaire	=	6	
	204	à	210	— sable et argile tendre	=	6	
	210	à	224	— argile compacte sablonneuse	=	14	
	224	à	264	— argile compacte	=	40	
	264	à	300	— argile compacte et sable	=	36	

Sondage n° 3741 de Galaat Andleuss. Altitude : 6 m. Exécuté à la fin de 1951 par un « Core-Drill » Franks 2 000 du Service spécial des sondages de la Direction des travaux publics, il recherchait de l'eau douce pour la commune Galaat Andleuss située dans des *prés salés*. Implanté à 160 m de l'affleurement anticlinal de Pliocène, il a recoupé l'Astien à 75 m de profondeur mais n'y a rencontré que de l'eau salée. J'ai alors demandé que l'on poursuive une reconnaissance jusqu'à la limite de puissance de l'appareil pour essayer de dépasser les argiles plaisanciennes et voir s'il n'existait pas dessous une lithologie à bonne fissuration. Il a atteint 368 m sans y parvenir. En examinant les « cuttings » j'ai trouvé des débris de faune. La coupe a été précisée par un carottage latéral effectué le 24 septembre 1951 par la Compagnie générale de géophysique. Ce procédé qui n'était pas utilisé à l'époque des travaux de la Manouba, consiste à descendre un cordon, auquel sont suspendus

1. Sans doute les sols de sebkra et en dessous les vases marines de la mer d'Utique.

des mécanismes explosifs fonctionnant comme des canons, reliés à un détonateur électrique à la surface. Le tir découpe normalement à la paroi un cylindre de roche meuble d'environ 3 cm de diamètre sur 5 à 10 cm de long. Les cotes de tir ont été réglées sans que je sois consulté à : 70, 80, 110, 115, 130, 134, 140, 175, 179, 189 m.

De 0 à 75 m. Quaternaire récent :

de	0	à	2	m	— argile bleue, sol de sebkra	=	2	m
	2	à	5		— vase de la mer d'Utique avec faune actuelle	=	2	
	5	à	25, 50		— limons rosés avec nodules de tuf et gravillons siliceux, formation continentale	=	20, 50	
	25, 50	à	35		— sable	=	9, 50	
	35	à	56		— limons rosés avec nodules de tuf, galets siliceux et calcaires entre 48 et 56 m	=	21	
	56	à	62		— inobservé	=	6	
	62	à	63, 50		— sable argileux	=	1, 50	
	63, 50	à	75		— argile beige rosée avec gros galets de calcaire blanc de la taille d'une pomme	=	11, 50	

De 75 à 200 m. Pliocène, faciès astien :

de	75	à	76	m	— argile brune fossilifère avec une pince de Crabe entière	=	1	m
	76	à	87, 50		— grès massif	=	11, 50	
	87, 50	à	111		— argile brune avec passées d'argile bleue	=	23, 50	
	111	à	113		— sable	=	2	
	113	à	119		— argile bleutée	=	6	
	119	à	125		— argile beige	=	6	
	125	à	156		— argile brune sableuse	=	31	
	156	à	166		— argile bleue pâle avec fragments de faune	=	10	
	166	à	200		— sable avec galets et quelques passées gréseuses à la base.	=	34	

De 200 à 368. Pliocène, faciès plaisancien : argile bleue compacte et homogène avec débris de faune fragiles et très blancs. Après 353 m, la formation paraît transgressive avec des graviers et des fragments de grès.

LA SÉRIE DE SONDAGES DE DJÉDEÏDA. — En liaison avec le programme d'aménagement de la basse vallée, de très nombreux trous de moins de 100 m ont été forés au trépan à la tarière ou en carottage continu, en particulier par le Service spécial des eaux de Bizerte, en 1950-1951. Ils ont donné lieu à des essais de perméabilité, mais les échantillons de terrain remontés ont été examinés, classés et soigneusement conservés par M. Steblin, ingénieur chef du Service, qui les a mis à ma disposition. Je retiens sept coupes dans la région de Djedeïda où l'on distingue des formations marines et continentales. La nomenclature adoptée pour cette série n'est pas celle des archives, mais un numéro d'ordre local. Chaouat est un lieu dit près de Djedeïda.

Sondage n° 4 à Djedeïda. Altitude : 17 m.

de	0	à	11	m	— argile grise sableuse avec passées de sable : sol de sebkra ou de plage au voisinage de la dune d'Henchir Kalbine	=	11	m
	11	à	12, 50		— sable avec nodules de tuf	=	1, 50	
	12, 50	à	55		— limon jaune ou grisâtre continental	=	42, 50	
	55	à	61		— sable marin coquillier avec petits galets de plage	=	6	

Sondage n° 6 à Chaouat. Altitude : 15 m.

de	0	à	17, 50		— argile grise passées sableuses	=	17, 50	m
	17, 50	à	33, 50		— sable marin coquillier avec graviers et galets intercalés de passées argileuses	=	16	
	33, 50	à	70, 25		— alternances de limons continentaux et de sable avec nodules de tuf	=	36, 75	

Sondage n° 6 A à Chaouat. Altitude : 15 m.

de	0	à	5	m	— limon continental	=	5	m
	5	à	10		— sol de sebkra	=	5	
	10	à	13, 50		— plage de la transgression d'Utique, sable coquillier	=	3, 50	
	13, 05	à	41, 50		— limon continental jaune sableux et sable	=	28, 45	
	41, 50	à	63		— sable coquillier avec passées gréseuses et passées ferrugineuses	=	21, 50	
	63	à	73		— limon continental rouge sableux	=	10	

Sondage n° 6 B à Chaouat. Altitude : 15 m.

de	0	à	21	m	— argile grise sableuse	=	21	m
	21	à	35, 50		— vase sableuse de la transgression d'Utique	=	14, 50	
	35, 50	à	51, 50		— sable et limon sableux	=	16	
	51, 50	à	54, 50		— sable marin coquillier avec passées gréseuses	=	3	
	54, 50	à	72, 35		— sable argileux	=	17, 85	

Sondage n° 6 C à Chaouat. Altitude : 16 m.

de	0	à	12	m	— argile grise sableuse	=	12	m
	12	à	16		— sable marin argileux coquillier	=	4	
	16	à	24		— sable sans doute marin avec graviers et galets	=	8	
	24	à	67, 40		— limon jaunâtre sableux avec passées sableuses	=	43, 40	

Sondage n° 6 M à Chaouat. Altitude : 15 m.

de	0	à	18	m	— sol de sebkra	=	18	m
	18	à	36		— vase de la transgression d'Utique avec faune	=	18	
	36	à	38, 40		— sable et argile	=	2, 40	

Sondage n° 8 à Chaouat. Altitude : 14 m.

de	0	à	7	m	— argile grise	=	7	m
	7	à	36, 50		— limon continental jaune et sable	=	29, 50	
	36, 50	à	48, 50		— sable avec débris de faune, graviers et galets de plage	=	12	
	48, 50	à	76, 75		— limon continental sableux	=	28, 25	

La faune rencontrée dans cette série n'a jamais subi de fossilisation. Les genres et les espèces sont actuels. Il y a des *Cardium*, des *Pectoncles*, des *Scutelles*. Dans les limons continentaux sont emballés des Pulmonés.

RÉCURRENCES MARINES D'UTIQUE ET DE DJEDEÏDA ET CYCLOTHÈMES SUPÉRIEURS. — Les sondages montrent d'abord la préexistence de la sédimentation marine d'Utique sous le remaniement continental. A Galaat Andleuss, la mer d'Utique n'a déposé que 3 m de vase, mais c'est l'emplacement d'un rivage. A la Cébala où l'on doit se rapporter à une coupe de sondeurs non avertis, les « marnes » inférieures de 20 à 34 m seraient les vases d'Utique, les 8 m de sable pouvant indiquer un cordon littoral, il y aurait 20 à 30 m de formations marines. A Djedeïda, les sondages 6 B et 6 M ont traversé les vases d'Utique sur 15 à 18 m et les ont trouvées en dessous du niveau de la mer, recouvertes par des terres marécageuses ou des sols de sebkra. Il s'agit d'anciennes lagunes émergées, évoluant en arrière de cordons sableux, les autres sondages les ont retrouvées partout. Le 6 A rencontre une plage ou un cordon littoral.

La transgression d'Utique surmonte des séries continentales et apparaît comme particulièrement éphémère. A titre de comparaison, signalons par avance que les sondages traversent 360 m de vases marines au rivage du lac de Tunis. L'épisode d'Utique marin en devient à peine sensible dans la paléogéographie régionale. Mais il prend un tout autre sens dans la réalité car c'est en fait une récurrence marine dans un cycle deltaïque. En effet, sous la récurrence d'Utique, les limons fluviaux sont identiques à ceux du dessus. A Galaat Andleuss, ils comprennent trois ni-

veaux riches en galets roulés à facettes arrondies. A la Cébala, les limons sont intercalés de sable et de lits de graviers et galets. Ce pourrait être des épandages de crues qui auraient envahi les terres après une rupture des levées, comme aujourd'hui dans la région de l'émissaire. A Galaat Andleuss, les galets deviennent plus grossiers vers la base, non pas parce que le fleuve plus jeune a été plus torrentiel puisque cette histoire débute avec un Quaternaire très récent, mais plutôt parce que le changement de lit qui l'a amené de Tunis à Utique se serait accompagné d'un remodelage du profil amont où une barre calcaire a pu être érodée.

Le faciès continental n'est pas davantage ininterrompu. Si le sondage de Galaat Andleuss ne retrouve pas de séquences marines cycliques sous la récurrence d'Utique, ce qui n'a guère de signification car il est en bordure de l'anticlinal pliocène, celles-ci ne sont pas reconnaissables non plus à la Cébala au milieu du bassin. Mais elles ont pu échapper à la sonde, les faunes n'étant remontrées que par hasard dans les « cuttings » ou même dans les carottes. D'autre part, la teinte bleue des vases, due aux hydrates de sulfures de fer, disparaît sous l'influence de la circulation des eaux souterraines, comme nous l'établirons pour le lac de Tunis. Or précisément plusieurs des petits sondages de Protville et Djedeïda ont ramené des roches meubles d'un rouge vif, rappelant beaucoup les vases devenues versicolores à Tunis, par suite de l'oxydation du fer qu'elles contenaient. Les séries de Chaouat et de Djedeïda retrouvent d'autres récurrences marines certaines. Les sondages 4 et 8 rencontrent des sables coquilliers avec des galets de plage débutant de 40 à 34 m sous le niveau de la mer. Les 6 A et 6 B traversent d'abord la transgression d'Utique, et en dessous une série marine distincte, séparée de celle du sommet par 28 m de fluviatile au 6 A ; la transgression profonde plus ancienne se distingue par une diagénèse plus poussée avec un début de cimentation des grès et une migration du fer.

En résumé, à la partie supérieure de la formation deltaïque, les sondages montrent sur 70 m deux récurrences marines séparées par trois remblayages fluviatiles et laissent supposer la continuation des cycles en profondeur. Dénommons-les *récurrence d'Utique* et *récurrence de Djedeïda*. On sait qu'on appelle cyclothème une période sédimentaire complète séparant deux récurrences et comprenant par suite une série marine et une série continentale. Grâce à la subsidence, l'alluvionnement du delta de la Medjerda a donc donné naissance à une des unités sédimentaires cyclothématiques. Les cycles d'Utique et de Djedeïda correspondent aux deux cyclothèmes supérieurs. Nous disposerons bientôt d'assez d'éléments pour caractériser l'unité cyclothématique débutant avec l'arrivée de la Medjerda dans le bassin d'Utique, que nous appellerons tout naturellement : *unité cyclothématique utiquienne*.

EXHAUSSEMENTS (voir fig. 42). — *Protville, La Mabtouba, Sidi Abdallah*. La région n'est pas seulement le siège d'une subsidence, mais aussi d'exhaussements, dont le caractère tectonique sera précisé. M. Solignac [1927] avait trouvé une faune marine à Protville et à la Mabtouha à 60 m d'altitude et l'avait attribuée au Milazzien à cause de la cote. En 1950, P. F. Burollet supprime les affleurements lorsqu'il dessine la feuille Porto Farina au 50 000^e de la carte géologique de la Tunisie ; cette simplification a été conservée dans le livret-guide de l'excursion A. G. du XIX^e Congrès géologique international et supplante le levé plus soigné de M. Solignac. En fait, des débris organisés de caractère marin indubitable existent. J'ignore leur état de conservation à l'époque de M. Solignac, aujourd'hui ils sont semés dans les terres labourées et mal respectés par les travaux des champs. A Protville, la surface horizontale porte des terres à blé rougeâtres, mais le talus rafraîchi par la Medjerda subit un décapage mécanique plus rapide que l'altération chimique et laisse percer des vases bleues avec les mêmes fragments de faune marine. A l'E de la route de Bizerte, avant Protville, à 1 km de la maison cantonnière, il y a deux buttes parallèles allongées N-S, près du lieu dit Sidi Abdallah ; on y retrouve les débris marins non épargnés par

la charrue, qui ceux-là avaient échappé à la perspicacité de M. Solignac. Ils existent également au sommet de la butte de la Mabtouha, autour d'une petite sebkra recouvrant une passée très argileuse.

Si l'on identifie à la rigueur quelques genres (reste de *Cardium*, par exemple), il serait impossible de déterminer une seule espèce et à plus forte raison une association faunistique. Avec les travaux modernes, les notions de terrasses quaternaires caractérisées par une altitude ont perdu toute valeur stratigraphique en Afrique du Nord. Cette étude leur portera d'ailleurs un nouveau coup. Tout ce que l'on peut dire c'est qu'il s'agit de transgressions marines plus vieilles que la transgression de Djedeïda.

Djebel Menzel Roul. Cette colline correspond à un exhaussement affectant un épisode fluvial. Le sommet est du Pliocène marin ; un contrefort plonge sur le petit pointement de Pliocène marin d'Utique, il est entaillé par la tranchée de la route de Tunis à Bizerte, dont le talus de limon alternativement fin et sableux comprend des bancs de grès lenticulaires formés de gravillons de quartz roulés ; le plus puissant de ces bancs est épais de 60 cm à 1 m. Il ne saurait s'agir de Pliocène continental puisqu'ici le Pliocène est marin. C'est par conséquent du Quaternaire, mais dans le bassin d'Utique la régression villafranchienne a été suivie d'une longue période sans sédimentation, marquée seulement d'altérations rougeâtres. La véritable sédimentation fluviale quaternaire débute avec l'arrivée tardive de la Medjerda, ces sédiments typiquement fluviaux ne peuvent qu'avoir été déposés par elle et doivent être rattachés à l'unité cyclothématique utiquienne. Par analogie les dépôts marins de Protville, de La Mabtouha et de Sidi Abdallah, exhaussés à des altitudes semblables, ne peuvent qu'être rapportés aux cyclothèmes utiquiens (voir fig. 43).

Les exhaussements précisent davantage les faciès cyclothématiques. Marins ils sont vaseux ou sableux, fluviaux ils forment des dépôts lenticulaires le long des berges, des épandages de crues, des dépôts remaniés dus au ruissellement. Le régime cyclique a été reconnu dans beaucoup de deltas, en particulier en Camargue par M^{me} Duboul-Razavet ; en raison de son aspect foliacé J. R. et R. D. Russel [1939] comparent le delta du Mississipi à un empilement de feuilles. Les intercalations de phases grossières dans les complexes fluviaux, comme les grès du Djebel Menzel Roul, s'expliquent en accord avec les vues théoriques de A. Rivière [1950], soit comme des crues envahissant des vasières ou des sebkas, soit comme des berges de chenaux. Après avoir examiné l'évolution littorale de la région d'Antibes, cet auteur prévoit les séquences sablo-vaseuses séparées parfois par des bandes plus grossièrement détritiques dans le cas où les apports sédimentaires sont suffisants pour compenser la subsidence. Nous avons là un exemple marqué toutefois par le caractère spécialement fin de la sédimentation, puisque les galets sont exceptionnels et peuvent être rapportés à un changement de lit. Reste à déterminer quels sont les facteurs responsables du rythme cyclique.

CAUSES DU RYTHME CYCLIQUE. — L'hypothèse la plus simple est celle des variations eustatiques, F. P. Shepard [1928] pensait que ce pouvait être la cause des transgressions et régressions au Mississipi. Mais sur le littoral tunisien, comme nous le verrons, les variations eustatiques sont inexistantes devant l'ampleur de la tectonique récente ou contemporaine. L'hypothèse classique supposerait des discontinuités dans la subsidence, mais la rapidité des changements de rivage apparaît comme si grande qu'elles sont peu vraisemblables. Au chapitre consacré aux plissements quaternaires, on préférera avec A. Bersier [1949] ne pas imaginer des pulsations tectoniques, quand il est possible d'invoquer des facteurs exclusivement géographiques.

J. R. Russel [1936] remarque que l'avancée terrigène du Mississipi s'effectue entre deux dépressions latérales : celle de Saint-Bernard en amont de l'île Chandeleur au N, et celle de Vermilion au S.

lion Bay au S. Il examine alors des mappemondes et voit que le Zuyderzee jouxte le Rhin, que le delta du Rhône, ceux du Nil, du Niger, du Tigre et de l'Euphrate, du Pô et du Danube sont toujours encadrés par des zones d'érosion marine plus ou moins caractérisées. Il avance une explication vraisemblablement valable pour le Mississipi : celui-ci débouche dans le géosynclinal de Golf Coast ; le poids des apports favoriserait la subsidence, et si la charge s'exerce sur un point limité, elle facilite un fléchissement de grand rayon de courbure à cause de la faible plasticité de l'écorce terrestre ; les lagunes décèleraient une subsidence, que le delta du fleuve ne compenserait qu'en partie. Les déplacements des rivages et de l'extrémité distale du cours suffiraient à provoquer les changements de faciès et par suite les cyclothèmes.

Il est certainement aventureux d'étendre cette théorie à d'autres régions, comme le fait Russel, sur le seul examen des cartes. En effet, la morphologie met en cause beaucoup de facteurs qui ne ressortent pas forcément sur des cartes, d'ailleurs plus ou moins précises, et c'est justement l'étude de la Medjerda qui peut en fournir la preuve. L'embouchure de ce fleuve modeste est, en effet, flanquée de deux lagunes, celle de Porto Farina et celle de la Sebkret Er Riana, et l'on devrait être tenté d'y appliquer *a priori* la même théorie. Toutefois nous avons vu que la formation de la lagune de Porto Farina s'explique par la seule action des phénomènes littoraux, et si l'alluvionnement ne s'étend effectivement pas au-delà d'un petit périmètre, il couvre quand même entièrement la dépression limitée par les bordures orogéniques, où pourrait s'effectuer la subsidence.

Il semble que dans ce cas le rythme cyclique dépende de causes locales, et de causes qui sont essentiellement d'ordre géographique. On pourrait peut-être alors penser qu'il a pu se produire un certain nombre d'oscillations climatiques, amenant périodiquement des tempêtes particulièrement violentes, au cours desquelles la mer aurait été capable de détruire les cordons sableux — ne formant en somme que de bien frêles barrières —, ce qui lui aurait ouvert un passage lui permettant d'inonder les vasières. Mais il est trop facile de faire varier le climat, facteur insaisissable, dans le sens qui paraît indiqué par l'observation superficielle d'un seul phénomène, et j'ai essayé d'éviter un si commode subterfuge. Cette interprétation n'expliquerait d'ailleurs pas les anciens lits aberrants de la Medjerda, numérotés 1 et 2, ni la présence de la lagune de la Sebkret Er Riana.

Sans imaginer aucune variation climatique, il doit donc être possible d'expliquer les faits par le seul jeu des actions sédimentaires. Le régime fluvial de la Medjerda, lui-même, n'est-il pas capable de provoquer à son embouchure ces avancées et ces reculs cycliques de la mer ? Avant d'atteindre cette embouchure, en effet, elle alluvionne et trace des méandres depuis la frontière algérienne, sur 300 km de plateaux horizontaux. Il est vraisemblable qu'un tel parcours a été affecté de nombreuses modifications, pouvant entraîner des changements momentanés de régime. Par exemple un bassin de décantation aurait pu s'établir derrière un barrage naturel comme le glissement de terrain d'Oued Lill, et retenir le débit solide. La mer privée d'apports passerait du rôle d'agent constructeur à celui d'agent d'érosion ; après colmatage du bassin, l'alluvionnement reprendrait. Mais un tel système, durant assez longtemps pour permettre l'érosion marine jusqu'à Djedeïda, supposerait une très grande échelle ; à titre d'exemple, le barrage réservoir du Mellegue n'est prévu que pour cinquante à cent ans, bien que devant opérer une filtration seulement partielle (en raison de son déversoir de crues). En outre, des phénomènes, qui sont supposés s'être passés loin vers l'amont, n'expliquent toujours pas les lits deltaïques aberrants 1 et 2, ni la formation de la Sebkret Er Riana.

En réalité, pas plus qu'il n'était nécessaire de recourir à de pures hypothèses concernant des variations eustatiques multiples, des subsidences saccadées ou irrégulièrement compensées, ou encore des révolutions climatiques, il n'est utile d'invoquer des modifications du cours supérieur du fleuve pour comprendre le mécanisme cyclique, car celui-ci peut s'expliquer uniquement par

l'observation et l'interprétation correcte des phénomènes affectant le littoral. Le seul problème est en définitive une interruption de l'apport solide. L'analyse détaillée de la construction actuelle, que nous venons d'exposer, suffit à montrer qu'elle porte en elle-même les prémisses de sa destruction future. Le delta actuel tend à se déplacer à la fois vers le large et vers le S. Quand il aura progressé assez loin, la baie limitée par les promontoires pliocènes de Gammart et du cap Farina, aura disparu. Le débit solide sera dispersé au large. Entraîné au S, il partira alluvionner La Goulette et Hammam-Lif. Au N, la mer privée d'apports deviendra érosive. Le vent ne transportera plus tangentiellement les fins accumulés depuis le cap Farina et, reprenant son effet normal, soutiendra l'action des eaux sur une côte frappée perpendiculairement. Le versant nord d'une presqu'île constituée de vasières à peine maintenues par de minces cordons sableux sera exposé aux attaques conjuguées de la houle et des vents et ne tardera pas à se démanteler et à se disloquer. Le golfe d'Utique envahi retrouvera alors sa vocation marine. Sans doute subsistera-t-il quelque temps, allongés au large de Gammart, quelques îlots, ultimes témoins de l'immense et temporaire remblayage.

On peut donc penser que la transgression d'Utique s'est effectuée après la ruine d'une avancée deltaïque succédant elle-même à la transgression de Djedeïda. Il est possible maintenant d'examiner les anciens lits aberrants 1 et 2. Au contraire des précédents toujours déportés vers le S, ils attestent une évolution vers le N, mais il s'agit cette fois d'un raccourcissement de méandres. Le méandre 1 *a* a été coupé par la corde 1 *b*, celle-ci raccourcie de nouveau en 2. Ce phénomène semble n'avoir pu s'effectuer qu'à une distance relativement importante de l'embouchure, et les lits 1 et 2 devaient donc se diriger vers l'extrémité d'un promontoire deltaïque parvenu à son plus grand développement, et qui par conséquent ne pouvait qu'être antérieur à la transgression d'Utique. Ils subsistent comme les derniers vestiges de cette construction sédimentaire. Au cours même de son érosion, alors que la partie aval était déjà détruite, ils continuaient à évacuer le débit solide le long du Djebel Amar, tandis que la mer rongait jusqu'à Djedeïda. La Sebkret Er Riana est le témoin de la chaîne de lagunes formées derrière l'ultime rebroussement périlittoral, analogues à celles qui prolongent aujourd'hui la Sebkret El Bounta. Voilà maintenant expliquées les deux lagunes de Porto Farina et de Sebkret Er Riana, dont les origines différentes ne rappellent en rien celle attribuée par Russel aux dépressions flanquant le Mississipi. Porto Farina marque la frontière atteinte par les alluvions qui remontent le golfe, Riana indique la position extrême du delta balayé progressivement vers le S et sapé dans sa partie nord à mesure qu'il grandit.

Cette dernière explication satisfait l'esprit en ce sens que tous les détails morphologiques s'y ajustent, qu'elle tient compte de toutes les actions climatiques actuelles et seulement de celles-ci, qu'elle ne fait appel à aucun facteur extérieur et qu'elle ne suppose rien d'inobservable.

Ainsi, après son arrivée sur l'autre versant du barrage d'Oued Lill, la Medjerda n'a pas dû s'interrompre de balayer, du N au S et du S au N, la plaine qui lui était impartie. Fleuve modeste, elle apporte un exemple de delta original. Les souvenirs historiques dont les rivages sont imprégnés ont permis de mettre en relief la rapidité des variations. Existe-t-il d'autres embouchures où l'on découvrirait une histoire analogue, si l'on pouvait se livrer à la même étude ? Si les cycles de la Medjerda se discernent, c'est grâce à une vitesse d'évolution qui provient, d'une part de l'importance du débit solide et de son caractère fin, d'autre part de ce que celui-ci s'entasse en bordure d'un continent rajeuni, siège d'une orogénie très active. Ailleurs les variations seraient probablement beaucoup plus lentes et par conséquent plus difficiles à interpréter.

SUBSIDENCE CYCLOTHÉMATIQUE. — Les dépôts alternativement marins et continentaux s'enfoncent par subsidence et s'empilent. Rappelons que nous entendons par cyclo-

thème le motif périodique d'une sédimentation rythmique. Dans le cyclothème supérieur l'épaisseur continentale atteint une trentaine de mètres à Djedeïda et s'amincit en sifflet vers la mer, elle n'est plus que de 3,50 m au puits Bou Fares et diminue encore en aval. Les régions distales émergées conservent leur faciès marin. L'épaisseur de la récurrence marine d'Utique reste de 15 ou 20 m au rivage de Djedeïda ; en aval, au-delà du rivage actuel, l'alluvionnement sous-marin a une puissance inconnue, qui risque d'être élevée à cause de l'accumulation sur place. Les recouvrements continentaux s'emboîtent comme des chevrons divisant la sédimentation marine, mais leur puissance totale est comparativement faible.

Les plaines cultivées de la Medjerda appartiennent à la terre pour le géographe et il a fallu recourir à une analyse détaillée pour comprendre la part qui, dans leur édification, revient à la mer. Il est significatif de penser, qu'après diagénèse, la géologie classique verrait des séries marines dans les stratifications argileuses ou marneuses avec quelques rares passées gréseuses. Les niveaux continentaux auraient des chances de passer inaperçus, puisqu'intercalés de bancs fossilifères. Aujourd'hui la diagénèse commençante fait disparaître la teinte bleue des anciennes vases pour leur donner uniformément un aspect rougeâtre trompeur, faussement continental ; il est d'ailleurs vraisemblable qu'à un stade futur, à l'achèvement de sa migration, le fer se rassemblera en concrétions et que cette apparence disparaîtra. Il faudrait alors procéder à une fine recherche stratigraphique à la poursuite des amincissements, des zones

d'érosion consécutives à des émergences, appuyées sur une étude paléontologique qui retrouverait peut-être des Pulmonés, des fragments de Phanérogames ou des pollens, et sur des analyses granulométriques, pour parvenir à reconstituer des séquences deltaïques. *Cet exemple peut inciter à supposer que les séries cyclothématiques d'origine paralique, si fréquente dans la stratigraphie générale, renfermeraient parfois des épisodes continentaux insoupçonnés.*

L'importance de la subsidence et l'épaisseur de l'unité utiquienne sont mal connues. Le sondage de Galaat Andleuss traverse celle-ci sur 75 m, mais il est près d'un rivage, également à l'aplomb d'un anticlinal dont le jeu s'est accompagné d'une érosion affectant visiblement le sommet du Pliocène et peut-être aussi la base de l'Utiquien. Le sondage de Cébala a traversé 300 m d'alternances. Il est implanté en dehors de l'extension du Pliocène marin dont un rivage est visible à Gammart, dans le domaine du Mio-Quaternaire fluviatile compréhensif. Sur une coupe de sondeurs, le Mio-Quaternaire n'est pas distinguable de l'Utiquien, car les passées gréseuses qui devraient le caractériser existent aussi dans les faciès utiquiens du Menzel Rouï. Remarquons toutefois qu'après avoir dépassé la profondeur de 140 m, les alternances deviennent plus épaisses et que les galets disparaissent, ce qui suffit peut-être à indiquer le passage d'un étage à l'autre. G. Castany, qui a vu les « cuttings », pense que les cent derniers mètres sont plus anciens.

L'épaisseur de l'unité utiquienne atteindrait 100 à 200 m. Elle est surprenante si l'on songe à l'établissement subactuel du delta. Depuis que s'est accompli le glissement de terrain d'Oued Lill, l'orographie des croupes et des thalwegs meubles du Mio-Quaternaire de Tunis demeure inchangée, malgré un climat générateur d'une érosion violente, tandis que pendant le même laps de temps, les formations d'Utique en subsidence se sont enfoncées de plus de 100 m. Cette con-

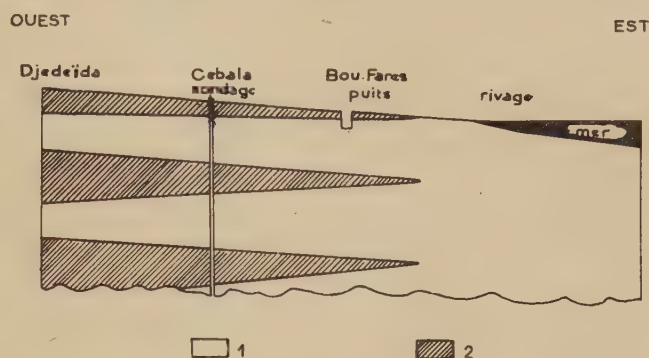


FIG. 12. — Schéma des cyclothèmes utiquiens.

1 : sédimentation marine ; 2 : remblayages continentaux et débordements fluviatiles.

tradition apparente s'explique du fait que si le climat et par suite l'érosion sont demeurés identiques pour l'ensemble des confins algéro-tunisiens, cette cuvette de 1 500 km² environ a reçu les alluvions provenant de l'érosion d'un bassin versant de 20 000 km². Quant à la rapidité de la subsidence, elle réclame une plasticité du substratum que l'on peut déjà souligner.

La hauteur à laquelle il faut placer le glissement local de l'Oued Lill dans l'échelle stratigraphique du Quaternaire n'est pas connue. Mais en postulant comme on l'a fait des facteurs dynamiques et climatiques invariant ou faiblement variant, on peut mesurer en années. Le bassin deltaïque a environ 1 500 km² depuis Tébourba jusqu'en mer au large de Gammart et cap Farina. Il reçoit 17 millions de tonnes correspondant à une érosion de 0,5 mm du bassin versant de 20 000 km². Supposons une dispersion au large toujours limitée, c'est-à-dire attribuons une durée éphémère à chaque presque île deltaïque débordant la baie ; la surface s'évalue en couvrant une carte d'un papier millimétré, le volume est plus difficile à inférer, je lui attribuerai 200 ou 300 km³. Il aurait pu se remplir en 30 000 ou 40 000 ans, l'erreur pouvant être de l'ordre de la grandeur mesurée.

Telle serait la durée possible de l'Utiquien. On peut la rapporter aux transgressions. Celle d'Utique a régressé en un millier d'années d'Utique à Porto Farina, soit une dizaine de kilomètres. Depuis Djedeïda il y a 30 km, correspondant à 3 000 ans. La transgression par érosion est évidemment plus rapide que la régression par colmatage, on pourrait admettre 5 000 ans par cycle. Depuis la date de l'établissement du barrage d'Oued Lill, il se serait déroulé six ou sept cycles deltaïques. L'Utiquien serait formé de 6 ou 7 cyclothèmes.

L'Utiquien constitue l'épisode le plus récent dans l'histoire du delta de la Medjerda, qui existait déjà au Tertiaire. L'épisode immédiatement antérieur, auquel se consacrent les chapitres suivants, se déroule pendant l'époque où la Medjerda empruntait la vallée de Tunis. On l'appellera *unité manoubienne*, du nom de la plaine de la Manouba. D'après les conclusions tirées de l'étude des affleurements pliocènes, nous le ferons débiter avec la régression villafranchienne, mais on ne risquera pas de synchronisation stratigraphique avant d'aborder une synthèse plus générale et on se contentera des termes locaux Utiquien et Manoubien. Au cours du Manoubien, la Barrière de Tunis empêchait les récurrences marines et l'unité manoubienne n'a pas de caractère cyclothématique défini. Elle est formée d'une subsidence toujours endoréique en amont de la Barrière de Tunis, accolée à un estuaire en aval.

CHAPITRE II

UNITÉ MANOUBIENNE

I. Principes préliminaires d'hydrogéologie et rôle aquifère des argiles.

Hydrologie des argiles. — Caractéristiques chimiques des eaux souterraines et diagramme hexagonal logarithmique.

HYDROLOGIE DES ARGILES. — Le régime endoréique intégral de la Manouba-Sedjoui était moins prononcé au cours du remplissage alluvial du bassin, qui constitue l'unité manoubienne antérieure à l'Utiquien, quand fonctionnait la vallée de Tunis. Toutefois, nous verrons que l'écoulement à travers la Barrière de Tunis, par le défilé de Bab Saadoune, n'assurait qu'un drainage incomplet. L'endoréisme caractérise le *Manoubien* ; de haut en bas, la sédimentation est marquée par ses rapports avec les eaux souterraines emprisonnées. Avant de décrire la région en détail, je rassemble les principes de l'hydrogéologie dans ce premier paragraphe.

Les eaux souterraines sont classées parmi les roches constituant l'écorce terrestre, mais sont souvent négligées à tort en pétrographie. Aux États-Unis, seulement, le « Geological Survey » publie des *Water-supply Paper*, mais, en Europe, les travaux les concernant se voient trop fréquemment relégués dans des publications diverses, où ils se mélangent à des problèmes d'hydrodynamique et se perdent, ou parfois même restent à l'état de rapports inédits. A propos de drainages, de forages ou de travaux publics, les ingénieurs s'attachent à des cas pratiques qu'ils résolvent de manière empirique, mais répugnent aux synthèses jugées trop théoriques et il peut en résulter des calculs superflus ou des erreurs. Même les définitions et les principes généraux prêtent à confusion ; c'est pourquoi j'ai jugé utile de revenir d'abord sur quelques lois d'importance primordiale, avant d'exposer mes résultats nouveaux concernant le rôle aquifère des argiles.

La mobilité est le caractère dominant des eaux souterraines, et les écoulements s'étudient mathématiquement. La loi de Darcy se trouve dans tous les formulaires. Porchet [1923] consacre une thèse de mathématiques aux écoulements des eaux à travers des colonnes de sable. On considère généralement que la formule de Dupuit était établie sur des basse fausses, mais A. Vibert [1949] la redémontre. Ces propriétés mécaniques trouvent des applications en Génie civil, mais la conséquence essentielle de la mobilité est souvent passée sous silence.

Dans l'écorce terrestre, les eaux souterraines s'enfoncent jusqu'à *saturer* les vides. Pour illustrer le caractère absolu de ce théorème, O. E. Meinzer, qui faisait autorité, dessinait tout simplement en tête de ses traités [1923 a] une carafe pleine de sable, dans laquelle il supposait de l'eau versée de façon à la remplir seulement à moitié. De cette manière il lui devenait facile de montrer que l'eau descend par gravité jusque dans la partie inférieure du récipient, où elle remplit tous les vides existant entre les grains de sable. Expliquant qu'il en est de même dans la nature, il appelait cette région inférieure *zone de saturation*. Il dénommait *water-table* sa surface supérieure et *zone d'aération* la portion qui la surmonte, dans laquelle s'effectuent des échanges avec la sur-

face du sol (infiltrations et évaporations). Dans tous les cas où les vides qui reçoivent l'eau sont petits, la water-table n'est plus une surface géométrique par suite de l'ascension capillaire, Meinzer disait qu'elle est surmontée d'une *frange capillaire*.

Cette répartition est absolument générale, mais la zone d'aération peut se trouver plus ou moins compliquée suivant les circonstances locales. Il peut en effet exister des nappes saturées peu épaisses au-dessus de la water-table, séparées par conséquent de la zone de saturation par une tranche de terrain non saturé ; cela arrive en particulier quand le relief est très découpé (fig. 13). Meinzer les appelait d'une manière imagée des eaux *suspendues*. Sauf dans le cas spécial des eaux suspendues, les puits productifs descendent au-dessous de la water-table, pénétrant légèrement la zone de saturation. C'est donc par les puits que peuvent être menées les investigations concernant la pente de la water-table et les variations de composition de l'eau ; d'où la nécessité de l'étude systématique des puits en hydrogéologie.

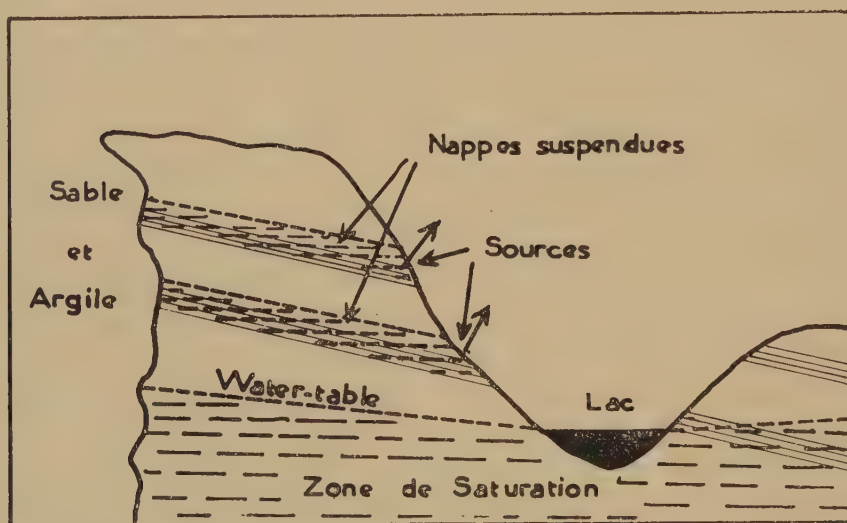


FIG. 13. — Équilibre des eaux souterraines d'après Meinzer.

Je conserverai les définitions de Meinzer, comme le fait par exemple en Europe S. Irmay [1947], et ne traduirai pas « water-table » car les mots français prêtent à confusion : niveau piézométrique ou nappe phréatique s'appliquent aussi bien à des eaux suspendues ; niveau hydrostatique désigne un équilibre entre diverses forces.

Tous les vides de l'écorce terrestre se trouvant saturés d'eau au-dessous de la water-table, les roches s'y classeront d'après leur volume de vides ; et d'abord en deux catégories : consolidées et meubles.

Les *roches consolidées* ont des textures compactes : roches cristallines, calcaires, quartzites, etc... Elles n'offrent de vides que dans leurs fissurations éventuelles et sont pauvres en eau. Quoique consolidés, les grès non quartziteux peuvent être poreux et se conduire à l'égard des eaux à peu près comme des roches meubles.

Les *roches meubles* sont les sables et les argiles. Au contraire des roches consolidées, le volume des vides ménagé entre leurs éléments est important. Les plus anciennes déterminations de la porosité des sables sont celle de Hazen Hallen [1892 et 1893]. On a eu recours depuis à des méthodes très diverses ; au Geological Survey des U. S. A. on coulait de la paraffine [Melcher, 1920], E. W. Washburn et E. N. Buntig [1922] utilisèrent de l'air comprimé. Les pédologues mesurent plus spécialement la porosité des sols, A. Demolon [1952] fait état des données expérimentales

de Kopecky [1927]. Les traités généraux modernes (par exemple, ceux de O. E. Meinzer [1942], C. F. Tolman [1947], F. Dixey [1931]) publient les résultats : le volume des vides varie de 30 à 40 % selon la forme et l'arrangement des grains, augmentant avec leur sphéricité et avec la mono-dispersion ou isométrie.

Tout comme les sables, les argiles et les marnes sont saturées d'eau sous la water-table, mais elles sont capables d'en recevoir des pourcentages plus importants et il est absolument nécessaire de considérer aussi leur porosité, même si l'on néglige souvent de le faire. Les rapports complexes de l'eau avec les particules fines font l'objet d'un important chapitre de la physique ; en ce qui concerne plus précisément l'hydrologie, Tolman se réfère à Dalla Valle [1943]. Sans entrer dans les détails, on peut dire que l'eau d'imbibition est retenue par les argiles de trois manières. Elle remplit d'abord les pores de la roche, où elle obéit aux lois de la capillarité. Elle peut être ensuite adsorbée à l'état moléculaire par les micelles argileuses colloïdales. Dans une revue industrielle récente, R. Leroy [1948] a étudié les phénomènes de mouillage sous l'aspect des contraintes moléculaires, en considérant les forces d'attraction ionique au niveau de la paroi mouillée entre les molécules d'eau supposées dissociées en H^+ , OH^- et les molécules de la paroi. Enfin les ions salins toujours adsorbés par les argiles peuvent être eux-mêmes hydratés.

Les porosités des sols argileux sont mesurées expérimentalement par les pédologues [Demolon, 1952], mais les résultats trouvés ne valent pas pour les roches profondes, puisqu'en surface l'adsorption d'eau par les argiles s'accompagne d'un gonflement non contrarié et que dans un terrain en place il est limité par les pressions. Les relations entre la teneur en eau des roches argileuses ou marneuses et les foisonnements ou tassements, qui peuvent en résulter, sont plutôt du domaine de la mécanique des sols. Deux études synthétiques ont été publiées par M. Buisson [1934], directeur du laboratoire de Mécanique des sols du Bureau Veritas. D'ailleurs, la quantité d'eau acceptée par une argile ou une marne profonde, saturée à sa capacité maximum, peut être simplement mesurée en soumettant des carottes de sondage à l'étuve à 110° ; elles retiennent une masse d'eau qui atteint 20 à 50 % du poids de la roche. La compaction des sédiments argileux au cours de leur diagénèse s'accompagne d'une certaine expulsion d'eau et représente l'aspect proprement géologique de la question. Elle est très lente. Elle a été étudiée notamment par N. J. Denissov [1946].

En plus de l'eau d'imbibition, les argiles contiennent encore de l'eau de constitution liée au réseau des minéraux argileux qui ne peut être déplacée qu'à des températures élevées. Cette eau, qui n'a pas d'intérêt pratique, n'entre d'ailleurs pas non plus dans les pourcentages mesurés par simple dessiccation. Mais à une profondeur suffisante, les déplacements éventuels de l'eau de constitution peuvent intervenir dans les phénomènes de géochimie.

En hydrogéologie toutefois, les teneurs en eau des roches n'ont pas une importance aussi immédiate que les vitesses d'écoulement possibles à travers leurs vides. D'une manière générale celles qui reçoivent l'eau dans des pores petits et nombreux en renferment davantage que celles à grande fissuration, et ce sont justement les roches meubles les plus fines, les argiles, qui en contiennent le plus. Mais au contraire, en ce qui concerne les facilités d'écoulement ou de drainage, on se trouve conduit à une classification opposée. Du fait des pertes de charge, la circulation est facilitée quand les vides sont de grandes dimensions ; pour les espaces les plus restreints elle est contrariée par les forces capillaires et, dans le cas des argiles, par les forces de rétention physico-chimiques. Ce sont les roches consolidées, fracturées, les plus pauvres en eau, qui permettent les plus gros débits souterrains. On peut pratiquement énoncer cette règle : les vitesses d'écoulement des eaux à travers les roches varient généralement en sens inverse de leur porosité absolue. Les termes *perméable* et *imperméable* s'appliquent uniquement aux propriétés mécaniques de l'écoulement, mais ne préjugent absolument pas des porosités.

Du moment que sous la water-table les argiles renferment des masses d'eau considérables, la question de leur rôle aquifère éventuel m'a paru pouvoir logiquement être posée. Autrement dit, j'ai commencé à me demander si la circulation des eaux dans les stratifications argileuses ou marneuses n'atteignait jamais une vitesse suffisante pour alimenter des sources naturelles ou des captages.

Les pédologues, assurément, mesurent expérimentalement les forces de rétention des sols pour l'eau, et notamment des sols argileux. Buckingham [1907] introduit la notion de potentiel capillaire ; elle est utilisée pour les calculs de Schofield [1935] ; d'autres recherches précisent la façon dont varie le comportement physique suivant les ions salins adsorbés [Ganossis, 1931]. Dans l'ensemble, les forces de succion apparaissent assez considérables, mais toutes ces expériences, uniquement appliquées aux sols, ne renseignent qu'assez vaguement sur les phénomènes plus profonds intéressant la zone de saturation.

On connaît depuis longtemps un certain nombre d'observations très sérieuses concernant des eaux qui franchissent des écrans argileux. Meinzer en a plusieurs fois rapporté. En Algérie, des faits de ce genre ont encore été signalés en 1951 sous la plaine de la Habra par Cl. Gemaehling et J. Pacquant, mais ils sont toujours considérés comme des exceptions sans signification générale et il n'y a qu'en travaux publics, pour les études de fondations, que l'on s'inquiète des effets pratiques du mouillage des terrains argileux ; en ce qui concerne l'alimentation des captages ou des sources, on admet que les déplacements sont trop lents pour jouer un rôle positif.

Au contraire, les phénomènes que j'ai observés dans le bassin de la Manouba m'ont conduit à lier beaucoup plus directement les porosités argileuses de la zone de saturation avec les courants hydrologiques souterrains. En effet, ceux-ci paraîtraient inexplicables dans ce cas particulier, si l'on n'admettait pas un large drainage des argiles. Le détail des observations est présenté plus loin avec les coupes de sondages et les renseignements techniques concernant leur régime d'exploitation. Pour en donner les résultats essentiels nécessaires à l'interprétation du rôle aquifère des argiles, il ressort que la sédimentation subsidente fluviale a formé des lentilles sableuses isolées dans une masse argileuse. Or, des sondages crépinés sous la water-table, à travers ces lentilles, fournissent jusqu'à 60 l/sec. ; un pompage prolongé fait apparaître des eaux ayant subi des échanges ioniques avec les argiles encaissantes. Si plusieurs lentilles sont superposées, les caractères chimiques de leurs eaux varient progressivement de l'une à l'autre comme s'il n'y avait pas de séparation.

En outre, indépendamment de la structure de la Manouba, les techniques utilisées pour « développer » un sondage auraient dû suggérer depuis longtemps que les argiles des terrains sablo-argileux tout au moins étaient drainables. L'opération consiste à améliorer le rendement des sondages exploitant l'eau des sables, en injectant un massif filtrant de gros sable ou de graviers calibrés par les orifices de la crépine. Les stratifications sableuses sont très fréquemment intercalées de lits plus ou moins argileux, et le massif artificiel ainsi créé prend la place des sédiments plus fins qui remontent à la surface. Le débit se trouve très augmenté, en particulier quand il est remonté beaucoup d'argile ou de limon.

Si les pressions hydrostatiques favorisent le drainage, les forces capillaires, auxquelles s'ajoutent les forces de rétention physico-chimiques, tendent à retenir l'eau dans l'argile. J'ai pensé que l'effet de ces forces de rétention devait diminuer quand le passage d'un milieu à l'autre était progressif, autrement dit quand il s'effectuait par l'intermédiaire de sables très fins au contact de l'argile. Il semble bien que les massifs filtrants injectés au fond des sondages diminuent les pertes de charge de cette manière, en rendant progressif le passage depuis les vides capillaires ou infracapillaires du terrain naturel jusqu'à la colonne cylindrique du tubage.

En fait, les stratifications sableuses intercalées dans l'argile sont toujours aquifères sous la

water-table, et quand elles ne sont pas exploitables c'est parce qu'elles contiennent de l'eau salée inutilisable. Comme l'aspect lenticulaire est rarement aussi clairement indiqué qu'à la Manouba, il restait possible de supposer, ainsi qu'on l'a toujours fait jusqu'à présent, que l'alimentation s'effectue exclusivement dans la zone d'affleurement, ou à défaut par des venues latérales. Mais dans le Sud tunisien où l'on a obtenu fréquemment ces dernières années des débits de l'ordre de 100 l/sec., avec moins de 200 mm de pluviométrie annuelle, la notion d'impluvium devient un peu arbitraire. Et par ailleurs, des calcaires fissurés, alternant également avec des argiles ou des marnes, peuvent être trouvés secs dans la zone de saturation, même s'ils présentent une surface d'affleurement. A Feriana, par exemple, dans la plaine steppique tunisienne, un sondage de recherche d'eau a recoupé sous une couche d'argile de 100 m d'épaisseur les calcaires qui affleurent aux environs ; quoiqu'à une profondeur de 80 m sous la water-table, dont le niveau était précisé sans équivoques par des sources, leurs fissures étaient sèches. Les calcaires éocènes fissurés en grand des écaïlles de Béja sont également pauvres en eau et ne drainent pas les alluvions argileuses de la Medjerda, dans les conditions même où le font les sables fins de la Manouba. A Béja comme à la Manouba les rapports avec les argiles sont identiques, mais quand il s'agit des calcaires, le passage entre les pores des roches meubles et les fissures karstiques n'est pas progressif. Le comportement différent des calcaires fissurés et des sables fins dans des conditions semblables m'a paru particulièrement significatif, et ne pouvait que me confirmer dans l'hypothèse que les forces de rétention arrivent à perdre beaucoup de leur importance, quand l'augmentation des diamètres des vides capillaires se fait d'une manière peu sensible.

Pour vérifier ces observations et leur interprétation nouvelle, et pour donner en même temps à cette interprétation une valeur plus générale, M. A. Rivière m'a engagé à procéder à des expériences dont il m'a suggéré le dispositif. Deux récipients identiques *a* et *b*, à fond de verre fritté de 64,4 cm² de surface, contiennent la même épaisseur de marne bleue de Cormeille en Paris (h). Dans le récipient *b* on a disposé, en outre, sous la marne et en couches superposées deux variétés de sables isométriques de cordons littoraux, pour essayer un drainage progressif : 90 % des grains du sable fin au contact de l'argile ont leur diamètre compris entre 0,18 et 0,20 mm ; pour les sables grossiers du dessous, les diamètres varient entre 0,25 et 0,7 mm. On recouvre d'eau et on établit un vide partiel sous les filtres en verre fritté, ce qui revient à soumettre les marnes à une pression hydrostatique correspondant à une colonne d'environ 7 m d'eau ; on reproduit ainsi les conditions régnant à la profondeur modeste de 7 m sous la water-table. On mesure le débit filtrant à travers ces marnes. Avec des températures de 17 à 18°, les résultats exprimés en cm³ par secondes et ramenés au mètre carré de surface de la couche marneuse sont les suivants :

	eau de la distribution municipale (Ca ⁺⁺ en solution : 100 mgr/l)		eau distillée	
	<i>h</i> = 20 mm	<i>h</i> = 40 mm	<i>h</i> = 20 mm	<i>h</i> = 40 mm
<i>a</i> : argile.....	6,7 cm ³ /sec.	1,4 cm ³ /sec.	2,7 cm ³ /sec.	1,35 cm ³ /sec.
<i>b</i> : drain sableux.....	25,1	27,9	24,4	22,3

Si dans le cas de *a* qui ne fait intervenir que deux milieux (marne et eau), les pertes de charges varient avec l'épaisseur traversée et avec l'état interne (l'eau distillée a tendance à défloculer l'argile et réduit la percolation), dans le cas de *b* le débit paraît constant. Il ne dépendrait plus que de phénomènes de surface à la limite entre l'argile ou la marne et le sable. Il semble seulement augmenter en cours de fonctionnement, le courant d'eau entraînant les colloïdes argileux dans les sables et rendant le contact de plus en plus progressif ; la valeur 27,9 est mesurée après une semaine de circulation.

Ce qui compte en fait dans ces expériences, c'est le développement de la surface séparant l'argile du milieu extérieur, qui est multipliée quand on établit un contact sable argile. Il apparaît qu'à pression hydrostatique égale, les pertes de charge diminuent en fonction de l'agrandissement de cette surface, suivant une relation qui reste à définir. Mais les résultats pratiques sont déjà importants et laissent envisager la nécessité d'un remaniement des principes les plus classiques

de l'hydrogéologie. En effet, si le débit est effectivement indépendant de l'épaisseur traversée, les valeurs trouvées sont considérables, car 20 ou 30 cm³/sec. par m² correspondent à un débit possible de 200 ou 300 l/sec. par hectare de contact entre deux stratifications, doublé si le drain sableux est limité par des argiles sur ses deux faces.

On aperçoit alors qu'il est arbitraire de considérer comme entités isolées les « nappes » contenues dans les couches sableuses limitées par des niveaux argileux. Les calculs de « rabattement » des nappes auxquels se livrent les ingénieurs perdent ainsi une grande partie de leur intérêt pratique. Par l'intermédiaire de sables intercalés, l'eau des argiles peut en outre contribuer pour une assez large part à l'alimentation des niveaux aquifères classiques, aussi bien que les fissures à grande circulation des formations calcaires karstiques. En effet, l'interposition de sédiments meubles à granulométrie plus grossière entre l'argile et la roche consolidée fissurée n'augmente pas seulement la surface de suintement argileuse, mais elle peut conduire l'eau qui en provient jusqu'aux débouchés très localisés des fissures.

Puisque les argiles et les marnes peuvent être drainables en certain cas, avec leur porosité élevée il est réellement possible de les considérer comme les *roches-magasins* de l'eau souterraine, car elles sont constituées d'eau pour le tiers ou la moitié de leur volume. Une série stratigraphique n'est pas autre chose qu'un empilement de *roches magasins* et de roches favorables aux écoulements à vitesse élevée que j'appellerai des *drains*. Il me semble nécessaire d'admettre que sous la water-table se trouve une unité aquifère non compartimentée en « nappes », exploitable partout où il y a des drains naturels. A la place des études habituelles sur l'alimentation des couches aquifères, c'est la recherche d'argiles ou de marnes drainables qui pourrait devenir un des buts principaux de l'hydrogéologie appliquée envisagée de cette nouvelle manière, car les captages paraissent réalisables chaque fois que la présence d'un drain permet d'imprimer une accélération suffisante à l'eau.

Même en admettant que la valeur de 200 ou 300 l/sec. par hectare soit plus ou moins exagérée par suite du nombre encore insuffisant d'expériences, il ne faut pas oublier non plus qu'elle a été observée dans le cas d'une pression hydrostatique faible. Le rendement d'une surface de contact doit suffire à assurer dans tous les cas l'alimentation des sondages les plus réussis que j'ai pu observer, parce que leur débit est freiné par les pertes de charges qui se produisent non seulement dans la colonne tubée mais aussi dans le drain naturel. Par exemple, un puits développé de 18 pouces de diamètre, exploitant l'eau d'un drain sableux de 100 m de puissance, ne peut guère dépasser 150 l/sec. En supposant que le drain sableux en question reçoive uniquement l'eau suintant au contact d'une paroi argileuse, les suintements permettraient l'exploitation de un ou deux sondages semblables par hectare. Si des sources analogues aux résurgences des pays karstiques, dont le débit est de l'ordre de quelques dizaines de m³/sec., étaient alimentées par des contacts argilo-sableux, moins d'1 km² de contact pourrait suffire.

Si les pertes de charges à la sortie d'une argile dépendent de l'état de sa surface, il ne faut pas oublier non plus le rôle de la pression hydrostatique. Il semble donc théoriquement qu'il puisse y avoir un seuil à partir duquel commencerait le drainage. Il s'est produit effectivement à la mine de phosphate de Kalaa Djerda un phénomène curieux, que je n'ai d'ailleurs pas observé personnellement, indiquant peut-être l'existence dans la nature d'un tel seuil. Les galeries souterraines de la mine sont creusées à travers un calcaire fissuré surmonté par des alluvions continentales argileuses. En 1951 à la suite d'irrigations pratiquées à la surface du sol, les fissures calcaires profondes se sont remplies d'eau qu'il a fallu pomper dans les galeries. Les irrigations ont naturellement pu élever légèrement la water-table, produisant par là une certaine augmentation de la pression hydrostatique. Cette très faible augmentation a peut-être été suffisante pour dépasser le seuil à partir duquel les fissures calcaires pouvaient drainer les argiles. D'une façon tout à fait

générale, je pense que la pression hydrostatique au sein d'un terrain profond n'est en définitive que la résultante entre la hauteur de la colonne d'eau et l'ensemble des pertes de charge, et notamment de celles qui se produisent à la traversée des argiles. On comprend que l'artésianisme en particulier puisse dépendre de pertes de charge complexes de ce genre.

Je signalerai pour achever une autre conséquence des expériences faites au laboratoire de M. Rivière. L'eau ayant traversé la marne de Cormeille en Parisis est modifiée dans ses caractères chimiques :

	pH (eau distillée)	teneur en Ca^{++} (eau de la distribution municipale)	teneur en K^{++}
Entrée.	6,5	100 mg/l	2 mg/l
Après traversée du récipient <i>b</i>	7,5	500	9,2
Après traversée du récipient <i>a</i>	8,05	1,200	26

Les marnes de Cormeille en Parisis contiennent 40,2 % de CaCO_3 , leur pH est 7,95. Les eaux échangent donc des ions avec les argiles en quantité d'autant plus importante que leur passage y est plus prolongé, celles ayant passé sans drain étant deux à trois fois plus salées. Il est certain que de l'eau légèrement alcaline à la température de 18°, dans laquelle aurait été immergé quelques minutes un bloc de craie, n'en dissoudrait pas 1,2 g. Mais les argiles facilitent les dissolutions, en étendant dans de très grandes proportions la surface de contact entre les ions salins adsorbés et l'eau qui les baigne. En extrayant cette eau par l'intermédiaire d'une couche de sable, on entraîne avec elle une partie des ions salins.

Les échanges ioniques entre l'eau et les colloïdes argileux du sol sont étudiés expérimentalement depuis longtemps par les pédologues, et considérés notamment sous leur aspect physico-chimique dans un ouvrage moderne de Kelly [1948]. Mais on pouvait penser jusqu'ici que les redissolutions à l'intérieur des argiles ou des marnes en place n'avait guère d'importance hydrogéologique. Maintenant il n'est plus possible de continuer à les négliger, si l'on admet que les eaux souterraines traversent habituellement de telles roches. Une grande partie de leur résidu sec peut provenir d'échange avec les marnes et les argiles, et par ailleurs, les sels retenus dans les roches argileuses peuvent leur avoir été apportés par des courants souterrains. Toutefois quand il n'y a pas d'écoulement endoréique, les sels sont normalement cédés par l'argile à l'eau dans la couche assez superficielle de l'écorce terrestre intéressée par l'hydrogéologie pratique, qui est la zone de lessivage.

Le bassin de la Manouba sera présenté comme un exemple d'application de ces faits nouveaux. Mais leur valeur est tout à fait générale, et il est certain qu'en montrant le rôle secondaire de l'impluvium, ils acquièrent une signification particulière en pays désertique. En effet, l'aridité n'a pour seule conséquence qu'un approfondissement de la water-table, mais l'eau de la zone de saturation reste utilisable comme ailleurs, partout où les drains naturels permettent d'établir un captage, sous réserve toutefois que l'évaporation à travers la zone d'aération n'ait pas produit une concentration excessive en sels solubles.

CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES. — La chimie des eaux est rendue difficile du fait qu'il n'existe pas en solution des sels définis, ceux-ci sont plus ou moins dissociés en ions. Le complexe commun à toutes les eaux est essentiellement constitué par trois métaux : calcium, magnésium, sodium en équilibre avec quatre ions électro-négatifs : CO_3^{--} , CO_3H^- , SO_4^{--} et Cl^- . Les proportions relatives des ions CO_3^{--} et CO_3H^- varient, toutes choses égales d'ailleurs, avec la concentration en CO_2 libre et le pH ; la concentration en CO_2 dépend le plus souvent des actions biologiques au niveau des sols.

Il peut s'ajouter à l'occasion des composés plus rares. Citons : *a*) des traces de Br^- ou I^- , K^+ , Ba^{++} , etc... qui n'existent en proportion notable que dans les eaux très concentrées ; *b*) des solu-

tions colloïdales : silicates et aluminates ¹; c) des composés organiques dans les eaux polluées. L'intérêt se concentre sur les sept ions permanents.

La solubilité des composants joue un rôle essentiel dans les variations de la composition. Toutefois, si la solubilité maximum d'un sel est bien déterminée, il est plus délicat de définir la solubilité relative de différents ions de charge opposée se trouvant dans la même solution. Par exemple, pour classer par ordre de solubilité le sodium et le magnésium, il faut tenir compte du fait que le carbonate de sodium est beaucoup plus soluble que le carbonate de magnésium, tandis que le chlorure de sodium est moins soluble que le chlorure de magnésium ². En moyenne, pour les métaux on peut adopter cette succession par ordre de solubilité croissante : Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ . Pour les métalloïdes : la suite croissante CO_3^{--} , SO_4^{--} , Cl^- est évidente.

Soit un écoulement au sein d'une formation géologique relativement homogène. Au cours de leurs mouvements, les eaux souterraines subissent l'influence de l'évaporation et leur concentration augmente vers l'aval. Elles peuvent dissoudre en outre des sels solubles, et notamment quand elles traversent des argiles, qui facilitent les dissolutions en augmentant considérablement la surface de contact avec les ions salins adsorbés, comme l'a montré l'expérience décrite au début du chapitre.

A ce lessivage doivent s'ajouter des échanges de bases entre l'eau et l'argile. H. Schoeller [1934 b] pensait d'ailleurs que les échanges de bases peuvent s'effectuer à l'occasion d'un simple cheminement au contact d'un écran argileux et leur attribuait un rôle dans la composition chimique des eaux « vadoses » en Tunisie. Ils sont naturellement facilités si les eaux circulent effectivement, comme je le pense, au sein de la roche argileuse. Les échanges de bases sont susceptibles de contribuer aussi à l'accroissement de salure vers l'aval. En effet, d'après la loi de Vageler rappelée par A. Rivière et P. Munier [1948] : dans des conditions homologues les différents cations sont inégalement adsorbés par les argiles. Si cette loi a été contestée dans sa forme primitive pour des raisons mathématiques, A. Rivière lui donne l'homogénéité qui lui manquait en définissant avec précision les coefficients de la formule de Vageler, et la confirme par des déterminations expérimentales de la capacité d'échange de base des argiles. Il résulte de la loi de Vageler que l'ion Ca^{++} peut déplacer plus que l'équivalence en ions Na^+ , c'est-à-dire que si un écoulement s'effectue sans apport d'infiltrations nouvelles à travers des argiles, ou simplement au contact avec des argiles, le remplacement du Ca^{++} en solution par un nombre de milliéquivalents plus grand de Na^+ s'ajoute à l'action de l'évaporation pour augmenter progressivement la concentration des eaux en ions solubles.

Dans le bassin endoréique de la Manouba-Sedjoumi le phénomène aurait même pu être contrôlé par son incidence sur le pH, en tenant compte du fait que Ca^{++} déplace Mg^{++} à un moindre degré, si les pH avaient fait l'objet d'études systématiques. Mais quand ils ont été mesurés, c'est en laboratoire après de multiples transvasements, si bien que les valeurs trouvées sont trop douteuses pour servir de base à des calculs.

L'accroissement de la concentration est lié à une modification des teneurs relatives de chaque constituant. Si l'on se restreint aux sels les plus habituellement retrouvés en dépôt dans les roches encaissantes, l'eau amont sera qualifiée par une forte proportion de CO_3^{--} et de Ca^{++} = *eau calcaire*. Puis viendra une zone intermédiaire riche en SO_4^{--} et en Mg^{++} = *eau sulfo-magnésienne*. Et enfin, un stade où prédominent le Cl^- et le Na^+ = *eau chlorosodique*. A mesure qu'elle se concentre en SO_4^{--} et en Mg^{++} , l'eau sulfomagnésienne laisse un dépôt de gypse, qui est le sulfate défini le moins soluble.

1. Une certaine quantité de silice peut exister aussi sous forme de silicates solubles.

2. La solubilité maximum à 20° (d'après le memento technique des Établissements Degremont) est de 178 g/l pour CO_3Na_2 ; 264 g/l pour ClNa ; 0,084 g/l pour CO_3Mg_2 ; 353 g/l pour Cl_2Mg , $6\text{H}_2\text{O}$.

Les deux derniers états sont plutôt observables en Afrique du Nord qu'en France, mais ils sont cependant classiques car l'étude et la recherche des eaux du sous-sol est généralement entreprise dans les contrées arides. E. de Martonne [1948] décrit les dépôts de sels solubles autour des ombilics d'évaporation endoréiques.

PROCÉDÉ DE REPRÉSENTATION : DIAGRAMME HEXAGONAL LOGARITHMIQUE. — Une bonne représentation graphique préalable est indispensable à toute étude chimique, mais elle se heurte à certaines difficultés. La première réside dans le caractère d'électrolyte de l'eau salée. L'analyse donne des résultats pondéraux, la comparaison des ions entre eux oblige à introduire la notion d'électrovalence. D'où pour chaque analyse une série de calculs pour obtenir les milliéquivalents, les *radicaux* de Stabler [1911]. On peut ensuite comparer les radicaux des différentes eaux sur des diagrammes. Les premiers ont été établis en Amérique par Ch. Palmer [1911], Rogers [1917], etc... Actuellement encore, les Américains continuent à s'astreindre à ces calculs et leurs représentations s'inspirent toujours du vieux procédé de Palmer légèrement perfectionné, comme par exemple celles de Hill [1940, 1942], de Langelier et de Ludwig [1942] ou de Piper [1944].

Mais en France, H. Schoeller [1935] a résolu également le problème et s'est complètement affranchi de ces opérations fastidieuses. C'est précisément en Tunisie, où l'avait appelé M. Gosse- lin alors directeur des Travaux publics, qu'il a poursuivi ses recherches d'après une idée d'A. de Stepanoff, avec la collaboration d'E. Berkaloff (les diagrammes de cristallisation fractionnée que l'on trouvera plus loin sont dus à E. Berkaloff). On utilise en ordonnée une échelle logarithmique pour chaque ion. Le principe consiste à disposer sur une même ordonnée les logarithmes des nombres égaux de milliéquivalents par litre. Les résultats pondéraux trouvés par l'analyse et notés tels quels sur ces échelles, sont alors multipliés graphiquement par la milléquivalence correspondante et deviennent comparables entre eux (fig. 17 B et 21).

Mais pour effectuer une synthèse hydrogéologique, quand on se trouve devant une centaine, ou parfois plusieurs centaines d'analyses, l'emploi de ces graphiques reste embarrassant parce qu'on ne sait pas d'abord comment grouper les eaux. Si l'on veut ensuite utiliser les distinctions établies grâce à eux pour dresser une carte hydrochimique, il faut affecter un numéro d'ordre ou un figuré caractéristique à chaque point de prélèvement. Le nombre de signes conventionnels est restreint par des considérations de lisibilité et le résultat conserve toujours un certain caractère schématique. Il y aurait intérêt à lier le graphique à la carte.

Un autre aspect qui mérite d'être signalé, c'est la disposition. L'alignement sur une rangée de parallèle des six ions permet surtout de comparer ceux que l'on juxtapose ; à cet égard, les méthodes américaines sont intéressantes. Un diagramme triangulaire comme celui de Piper oppose les alcalino-terreux au sodium, conformément aux principes de Palmer, mais en même temps il réalise une représentation mieux groupée et permet, par exemple, d'étudier les mélanges de deux ou même de trois eaux, qui ne ressortent pas du tout sur les diagrammes alignés.

La représentation graphique que j'ai proposée [1951] s'inspire d'un procédé ancien, celui de l'Américain Tickell [1921], adapté à l'établissement de cartes : le principe consiste à affecter un hexagone à chaque analyse et à le dessiner sur la carte à l'emplacement du lieu de prélèvement. Pour rendre cet ancien système pratique, il fallait le faire bénéficier des avantages dus à H. Schoeller, c'est-à-dire porter sur les rayons de l'étoile hexagonale le logarithme du nombre de milliéquivalents par litre.

Le système primitif confondait la teneur en Ca^{++} et Mg^{++} en une teneur totale et nous venons de voir que ces ions caractérisent des familles d'eau différentes, comme l'avait d'ailleurs fait remarquer H. Schoeller. Les séparer revenait à ajouter une branche et à perdre les avantages

géométriques de la forme hexagonale. Dans cette forme simple, si les teneurs exprimées en milli-équivalents des différents ions sont égales, l'hexagone de représentation est un hexagone régulier ; un déséquilibre entraînant une déformation est immédiatement visible. Un heptagone régulier, au contraire, ne serait pas habituel à l'œil. On aurait pu prendre 8 axes ; toutefois, j'ai d'abord pensé à supprimer les carbonates qui varient dans de faibles limites. Pour l'axe des *résidus secs*, j'avais adopté une échelle arithmétique qui faisait ressortir les différences de concentration. Ce premier diagramme mis au point en 1950 a déjà été employé au Service géologique de Tunisie par R. Degallier et par moi-même pour des synthèses hydrogéologiques dans les régions du Centre. L'usage a permis d'y déceler certaines imperfections.

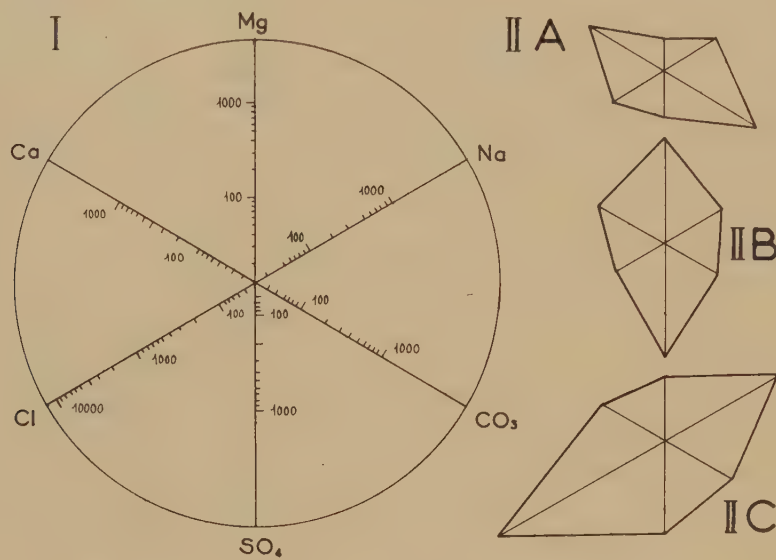


FIG. 14. — Diagramme hexagonal logarithmique.

I : Abaque pour la représentation des analyses chimiques des eaux souterraines.

II : variations de la forme du diagramme. A, pour des eaux peu chargées en sels solubles ; B, pour des eaux moyennement ou fortement chargées ; C, pour des eaux très fortement chargées.

Ultérieurement j'ai supprimé la représentation du résidu sec, rétabli celle du CO₃⁻⁻ et j'ai cherché à disposer dans un ordre rationnel les 6 ions de l'équilibre chimique. La fig. 14 I reproduit le dispositif choisi, des statistiques établies sur un nombre d'analyses suffisant ont montré qu'il s'adaptait le mieux aux différentes eaux naturelles. Une eau peu chargée, dont la proportion en CO₃⁻⁻ et en Ca⁺⁺ est forte, est étirée dans le sens NW-SE (fig. 14 II A). Une eau chargée, riche en SO₄⁻⁻ et en Mg⁺⁺ est étirée dans le sens N-S (fig. 14 II B). Et une eau très concentrée avec Na⁺ et Cl⁻ est étirée dans le sens NE-SW (fig. 14 II C). Quant aux eaux aberrantes, par exemple, celles circulant dans des terrains riches en SO₄ Na₂, elles forment un diagramme coudé.

Ainsi la prédominance d'un composé parmi les ions dissociés devient visible.

Pour représenter le résidu sec, on peut ajouter quand on le juge utile un cercle central en surcharge. Je ne l'ai pas fait sur les cartes dressées à la Manouba et autour du lac de Tunis, parce que les points d'eau sont si voisins que les hexagones se chevauchent et cela crée un élément de confusion. D'ailleurs les changements d'orientation, qui accompagnent les variations de salure, sont assez nets pour en permettre l'interprétation.

II. Un exemple de water-table endoréique à la Manouba-Sedjoumi.

Les conceptions exposées ci-dessus procèdent pour une grande part des réflexions que m'a suggérées l'étude du bassin de la Manouba. Le drainage des *roches-magasins* argileuses demanderait à être vérifié avec de nombreux exemples ; je signalerai simplement ici que j'ai pu l'étayer sur des bases plus larges au cours de mes recherches. Les stratifications sableuses incluses dans une masse argileuse saturée d'eau m'ont toujours paru aquifères, même quand il s'agit de passées aussi lenticulaires que des cordons littoraux abandonnés au cours d'une régression marine dans un bassin deltaïque en subsidence, comme c'est le cas au bord du golfe de Gabès. Dans les complexes argilo-sableux, notamment dans les plaines du Centre et du Sud tunisien, j'ai chaque fois trouvé la circulation des eaux indépendante des variations lithologiques.

La plaine de la Manouba s'étend au SW de Tunis, disposée en diagonale à travers la carte, allongée dans le sens NW-SE. La végétation est abondante, grande culture et vergers séparés par d'épaisses clôtures de Cactus. Le sol supporte une population dense et disparaît sous les maisons, fermes ou villages, les déblais divers, les jardins et les routes. Le seul terrain visible est toujours une argile monotone, brunâtre ou rougeâtre, plus ou moins transformée en terre végétale pauvre en humus. La Sebkra Sedjoumi, à son extrémité aval, offre l'aspect d'une cuvette rigoureusement plane d'environ 30 km² de superficie, submergée l'hiver sous une mince lame d'eau qui disparaît au printemps et présentant l'été une surface brillante plus ou moins incrustée de sel.

La détermination de la water-table résulte des observations effectuées dans les puits. Le travail fastidieux de leur relevé est donc essentiel.

En Tunisie le Bureau d'inventaire des ressources hydrauliques (B. I. R. H.), créé et dirigé par E. Berkaloff, demande à tout agent des Travaux publics appelé sur un territoire de s'inquiéter des points d'eau et impose le relevé d'une documentation complète à résumer sur un formulaire imprimé. Il recommande d'accompagner chaque fiche d'un échantillon de l'eau, aux fins d'analyses chimiques.

La documentation ainsi rassemblée est complétée par la centralisation des renseignements que peuvent donner tous les travaux concernant directement ou indirectement l'eau : sondages de recherche ou d'exploitation des nappes profondes, aussi bien que ceux ayant un autre but (grands travaux par exemple) susceptibles de recouper des terrains aquifères. De ce côté le B. I. R. H. a le caractère d'un fichier géologique. Cette documentation, qui prend une ampleur rapidement croissante, est l'objet d'un classement qui s'effectue suivant des règles précises. A cet effet chaque point d'eau est affecté d'un numéro régional.

La fig. 15 A est établie d'après une carte au 20 000^e groupant 218 puits, mais ne fait appel malgré tout qu'à un nombre relativement faible d'entre eux. Autour de la commune de la Manouba, notamment, les jardins sont irrigués et la densité des puits est voisine de 1 à l'hectare. Il y a toujours quelques difficultés à déterminer le niveau de la water-table. En effet, la hauteur de la colonne d'eau dans chaque puits avoisine 6 m, et lors des irrigations ils se tarissent après quelques heures de pompage à gros débit effectué au moyen d'une pompe rotative entraînée par un moteur à combustion ou une éolienne ; le lendemain, après une nuit de repos, l'eau n'a pas toujours regagné son niveau d'équilibre. D'autres au contraire, peu utilisés, sont remplis à leur cote maximum. Des variations saisonnières viennent encore compliquer la situation, quoiqu'à un moindre degré, car la plupart des reconnaissances ont été effectuées au printemps. Le meilleur critère d'exactitude consiste à comparer des puits voisins, les valeurs aberrantes sont alors supprimées de la carte. Quant à la cote d'orifice du puits, elle peut être établie avec une grande précision grâce à la nouvelle carte au 5 000^e de Tunis et de ses environs.

La cuvette de la Manouba est le siège d'un écoulement endoréique des plus classiques et très simple. L'eau converge vers l'ombilic de la sebkra et, ne trouvant plus d'issues, s'évapore. La pente de la water-table donnée par la profondeur des puits est proportionnelle à la vitesse d'écoulement au sommet de la zone de saturation. Ici la pente diminue vers l'aval, au fur et à mesure que la water-table rejoint la surface du sol. La sebkra est située entre les cotes de variations

saisonnières : l'hiver elle est noyée sous la water-table ; l'été elle est au-dessus de la frange capillaire amincie par l'évaporation. Sa surface géométriquement plane épouse l'aspect d'une nappe liquide. La commune de Manouba correspond à une dépression secondaire de la water-table, qui pourrait indiquer une passée plus sableuse, mais il s'agit plutôt d'une répercussion du pompage intensif dans les jardins.

Les salures ou résidus secs augmentent de la périphérie à l'ombilic d'évaporation. Le phénomène est assez régulier pour qu'il soit possible de déterminer des zones à l'intérieur desquelles les eaux présentent des caractères semblables. D'abord très étalées, celles-ci se rétrécissent vers la sebkra qu'elles enserrent d'auréoles concentriques rapidement rapprochées. Une augmenta-

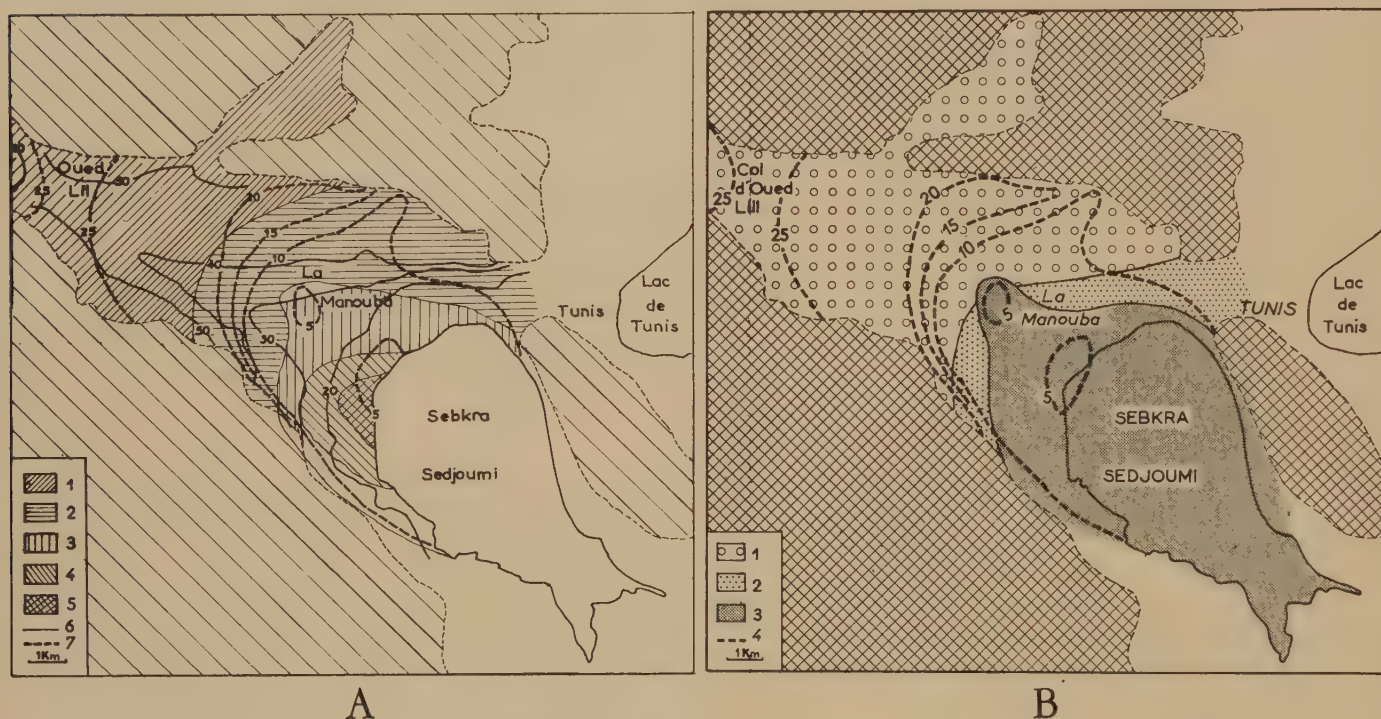


Fig. 15. — Manouba Sedjoumi.

A : Carte de la water-table. 1 : salure des eaux $< 1 \text{ g/l}$; 2 : comprise entre 1 et 2 g/l ; 3 : entre 2 et 4 g/l ; 4 : entre 4 et 8 g/l ; 5 : $> 8 \text{ g/l}$; 6 : courbes de niveau topographique de la plaine; 7 : courbes de niveau de la water-table.

B : les auréoles endoréiques de la Manouba-Sedjoumi. 1 : région calcaire; 2 : région gypseuse; 3 : région chlorosodique; 4 : courbes de niveau de la water-table.

tion de la salure accompagne la dépression du pompage de la Manouba. Elle est également classique sous le climat tunisien ; en effet, les eaux d'irrigation s'évaporent en partie et ce qui s'en infiltre accroît la salinité des eaux au voisinage de la water-table.

Le sol de la sebkra, enfoncé sous la water-table ou au sein de la frange capillaire, est saturé d'eau à sa capacité maximum et par conséquent n'est plus aéré. Il pourrait s'y développer des fermentations organiques ; dans les marais européens elles sont multiples (tourbe, vase, gaz des marais, etc...). Ici les limons sont bleutés, légèrement vaseux mais nullement fétides, les sondages n'ont pas découvert de dégagement gazeux ; toute vie se voit contrariée, pratiquement interdite par suite de l'excès de salinité, c'est le règne des sels.

L'étude des variations de composition ionique est basée sur le dépouillement des analyses. Les diagrammes en considèrent 110. Les pH, qui n'ont pas été mesurés sur place au moment du prélèvement mais ultérieurement en laboratoire, ont une valeur discutable et souvent erro-

née. La valeur DH ou *degré hydrotimétrique* considère la somme des alcalinoterreux Ca^{++} et Mg^{++} , pour permettre de les opposer éventuellement à Na^+ .

E. Berkaloff a complété les diagrammes en prévoyant d'autres échelles, qui permettent des calculs de précipitation fractionnée basés sur le principe de la loi d'action de masse ; on trouvera plus bas l'exemple de SO_4Ca . Il propose également des abaques donnant les teneurs en CO_3Ca et en CO_2 libre admissibles avec le pH, mais n'a jamais publié les relations, découlant aussi de la loi d'action de masse, sur lesquelles sont basées ces ingénieuses constructions.

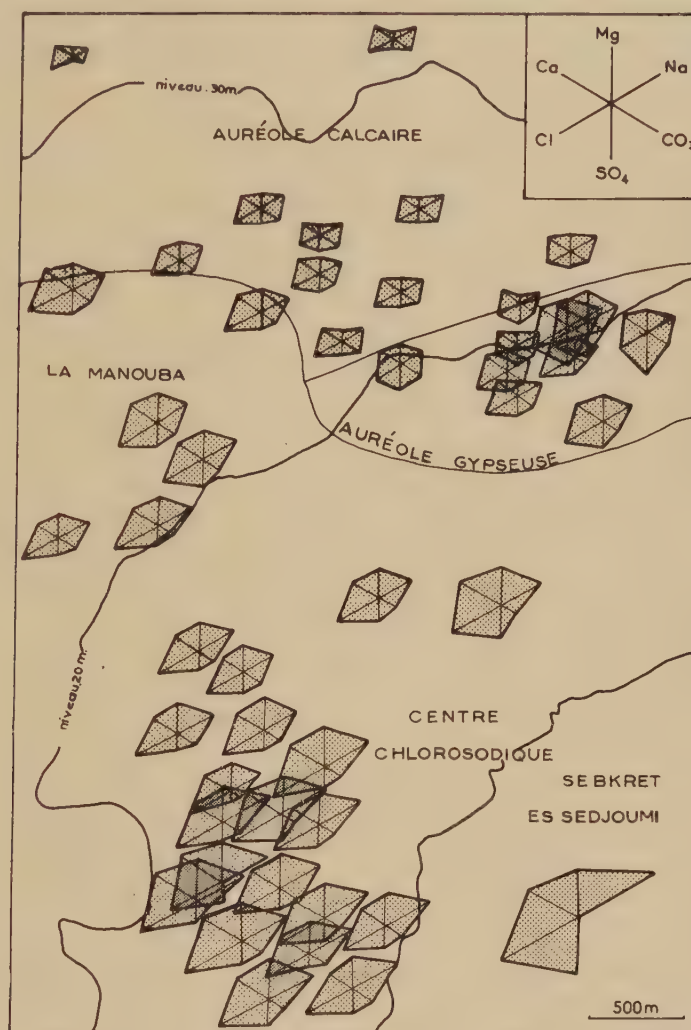


FIG. 16. — Carte-diagramme d'une partie de la water-table endoréique de la Manouba-Sedjoumi.

Les diagrammes montrent que la proportion des ions solubles croît en même temps que les salures globales. Pour les cations, la teneur en milliéquivalent de Ca^{++} est d'abord supérieure à celle de Mg^{++} (le degré hydrotimétrique étant supérieur à la teneur en Na^+). Pour les anions, le CO_3^{--} est supérieur au SO_4^{--} . Ces proportions s'équilibrent bientôt puis se renversent, et Na^+ et Cl^- dominent alors. Le report des diagrammes sur la carte fait apparaître une répartition très caractéristique (fig. 15 B) :

Deux auréoles concentriques : l'*auréole calcaire* et l'*auréole gypseuse* entourent un *ombilic chlorosodique*.

La carte où sont figurés les diagrammes logarithmiques hexagonaux, ou la carte-diagramme, permet de suivre les variations progressives dans tous leurs détails. Avec le grand nombre de points d'eau, il était difficile de la réduire à une échelle inférieure au 20 000^e ou au 30 000^e et sa grande taille la rendait difficile à reproduire dans son ensemble. La carte-diagramme de la fig. 16 est simplement une bande découpée à travers les trois zones. Dans la tranche choisie, un détail perturbe la régularité du phénomène. Une extension de l'ombilic chlorosodique coupe l'auréole gypseuse. Elle résulte de l'augmentation de salure, même légère, qui accompagne comme on l'a vu les irrigations de la Manouba, et elle est due à la réinfiltration des résidus d'évaporation.

La raréfaction des carbonates au voisinage de la sebkra ne dépend pas seulement de l'équilibre chimique mais aussi de la disparition de la végétation due à la salure des sols et par suite du CO₂ d'origine végétale.

Il est possible de suivre en détail l'aspect chimique de la concentration dans l'ombilic, E. Berkaloff ayant profité d'un sondage, creusé en automne 1949 dans la sebkra, pour procéder à des analyses périodiques au courant de l'hiver et du printemps 1949. Les échantillons ont été prélevés dans le trou du sondage à partir du moment où il s'est vu accessible, c'est-à-dire alors que la nappe était déjà en partie évaporée et commençait à descendre en dessous de la surface du sol. Il est en effet impossible de circuler dans les lises de la sebkra quand elle est submergée.

Le tableau donne les dates de prélèvement et les résultats des analyses en mg/litre.

N° D'ORDRE	DATE DU PRÉLÈVEMENT	ANALYSE CHIMIQUE								
		Ca	Mg	Na	Cl	SO ₄	CO ₃	pH	DH	R. S.
1	7 février 1949	559	101	1 541	2 627	1 290	47	7,15	177	6 240
2	7 mars 1949	9 802	131	2 179	3 650	1 886	33	7,2	249	8 930
3	29 mai 1949.	1 175	248	3 910	6 925	2 678	36	—	387	15 480
4	7 juin 1949.	1 905	518	8 740	13 845	4 491	24	—	674	31 890
5	11 juillet 1949	2 090	929	15 870	26 270	5 356	33	—	885	51 340

Les résidus secs débutent à 6 g/l caractérisant une nappe déjà fortement évaporée (les échantillons prélevés dans les puits limitrophes de la sebkra, généralement à la fin du printemps, atteignent 5 à 6 g/l). Ils augmentent rapidement pour dépasser 51 g/l en juillet.

Le graphique de la fig. 17 A traduit la marche du phénomène. L'augmentation de la concentration s'effectue avec une accélération croissante. C'est d'une part parce que l'intensité de l'évaporation augmente en été ; c'est surtout parce qu'à mesure que la solution se concentre, la quantité d'eau évaporable diminue et demande moins de temps pour se trouver éliminée. La courbe a une allure exponentielle, car elle se transforme approximativement en droite en adoptant une échelle logarithmique pour les résidus secs.

CRISTALLISATION FRACTIONNÉE. — Pour un sel simple, la solubilité dépend de la loi d'action de masse qui prend alors le nom de loi de dilution d'Ostwald. Le problème se complique dans le cas d'une solution comportant plusieurs ions. On peut le résoudre par une méthode graphique, en utilisant le diagramme de E. Berkaloff (fig. 17 B). Il a porté le point de saturation du SO₄Ca, 2 H₂O, à mi-distance entre l'axe SO₄ et l'axe Ca. La construction consiste à joindre le point SO₄ au point Ca et à regarder si la droite tracée atteint la hauteur du point de saturation. Un terme correctif tient compte de la teneur en Na, la présence d'un sel qui a un ion commun ayant pour effet d'abaisser le point de saturation. Le stade de cristallisation du SO₄Ca, 2 H₂O est atteint à partir du troisième prélèvement, c'est-à-dire le 29 mai. A ce moment, la teneur en ions SO₄⁻⁻ et en ions Ca⁺⁺ n'augmente plus que faiblement. Il y a encore une masse d'eau importante affleurant presque la surface du sol. Le gypse cristallise lentement et en profondeur en profitant des fissures, dans une solution en cours d'évaporation lente. Ce sont des conditions favorables à la formation de gros cristaux.

Dans les coupes des sondages détaillées (p. 70), on relèvera de grands cristaux en fer de lance sous la sebkra, entre 12 et 16 m et surtout entre 29 et 32 m. Un sondage a traversé une sebkra fossile où de très gros fers de lance ont été trouvés entre 27 et 51 m. Ceux-ci ont pu être nourris postérieurement. Les « fleurs des sables » des touristes, que l'on ramasse dans le lit des oueds du Sud, contiennent du gypse qui n'a pas d'autre origine ; il cristallise quand l'évaporation a concentré les eaux de ruissellement au point voulu.

Les sulfates de magnésium et de sodium sont plus solubles, mais la teneur en sulfate dans les eaux résiduelles reste cependant limitée par la solubilité. La fig. 17 C oppose la courbe des chlorures à celles des sulfates, tandis que celle-ci plafonne, la première conserve la forme exponentielle. La fin de l'évaporation devient très rapide, trop rapide pour que puissent se former de beaux cristaux, et il se constitue en surface une croûte pulvérulente. A Sedjoumi, on observe essentiellement du NaCl. Dans les grands chotts du Sud, la quantité d'eau évaporée est telle qu'il finit par se produire une concentration exploitable en ions solubles rares : I^- , Br^- , K^+ .

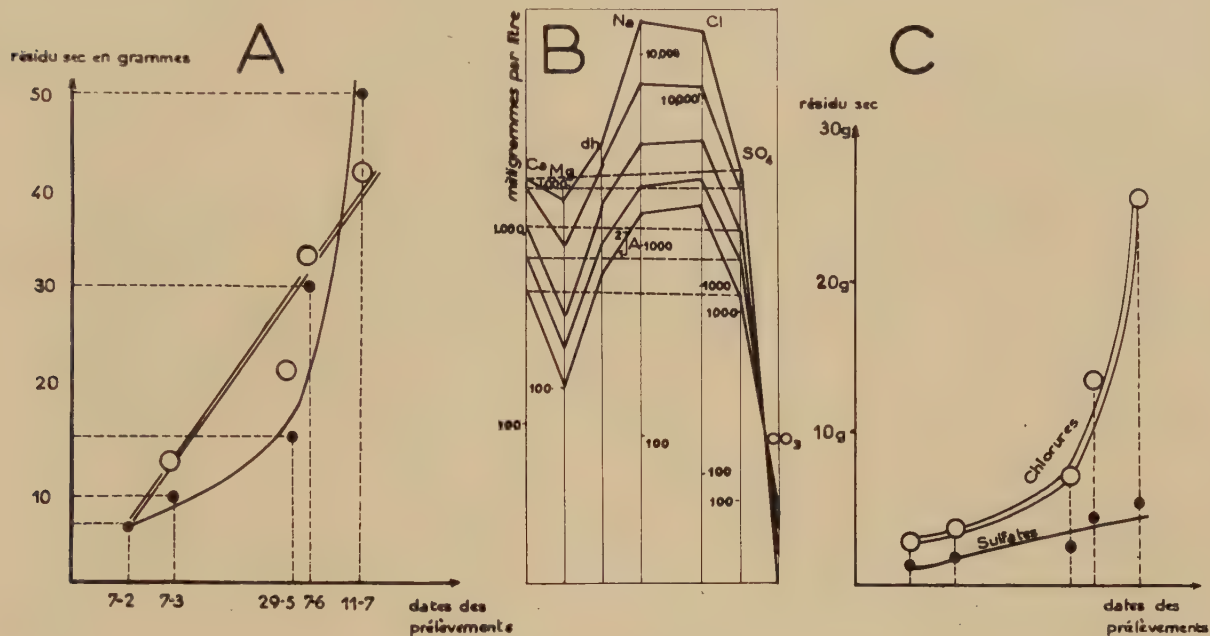


FIG. 17. — Sebkra Sedjoumi.

A : augmentation en sels dissous en fonction de la durée d'évaporation. Les cercles blancs représentent les résidus secs, reportés en ordonnées logarithmiques.

B : diagrammes des cinq prélèvements effectués en février et mars dans la Sebkra Sedjoumi d'après la méthode de E. Berkaloïff. A : point de saturation en SO₄Ca (1 : avec 0 g de Na ; 2 : avec 2 g de Na).

C : cristallisation fractionnée (analyses des eaux résiduelles).

La cristallisation fractionnée forme donc des sels authigènes. Toutefois le calcaire de l'auréole calcaire peut avoir une origine partiellement allogène, car les limons du bassin de la Manouba proviennent surtout de massifs crétacés. En définitive l'écoulement endoréique déplace des minéraux et remanie les résidus insolubles et les hydrolisats allogènes en conférant à la sédimentation un caractère authigène. On est fondé à parler de faciès sédimentaire *endoréique*.

Mais si les eaux en s'écoulant confèrent leur salure aux terrains, elles peuvent également dissoudre certains de leurs éléments si bien qu'elles voient éventuellement leurs caractères chimiques propres se modifier au cours de leur migration. Dans ce cas leur étude donne alors des renseignements sur les structures géologiques des régions qu'elles traversent. Revenons à la carte-diagramme : le centre chlorosodique déborde en amont l'ombilic de la sebkra, ceci peut signifier qu'avant de l'atteindre, les eaux ont franchi un territoire déjà auparavant enrichi en chlorures. Nous verrons que ce fait indique une extension anciennement de la sebkra.

III. Drainage des argiles dans la zone de saturation de la Manouba.

Les sondages. — Lithologie. — Variations chimiques et déplacement des eaux au sein de la zone de saturation (indépendance entre les caractères chimiques et les drains sablo-gréseux, mouvement ascensionnel et

couverture salée, évaporation, infiltration, influence lointaine de l'ombilic). — Principe d'une exploitation hydraulique par sondage.

LES SONDAGES. — Grâce à la proximité du centre d'activité qu'est Tunis, la densité des puits est élevée et de nombreux travaux profonds ont été effectués. Des sondages ont été exécutés au fond des puits préexistants pour en augmenter le rendement et certains sont descendus jusqu'à 100 m. L'administration des Travaux publics de son côté a procédé à des investigations plus poussées, le sondage le plus profond dépasse un peu 620 m. Il s'agissait d'améliorer la distribution des eaux municipales, les résultats obtenus permettent d'alimenter d'une façon autonome la commune de la Manouba. L'abondance tout à fait exceptionnelle des renseignements récoltés a permis une représentation précise de la zone de saturation.



FIG. 18. — Situation des sondages des environs de la Manouba.

1 : sondages < 100 m ; 2 : sondages ≥ 100 m. Chaque sondage est accompagné de deux chiffres, celui du numérateur étant un numéro d'ordre, celui du dénominateur indiquant la profondeur mesurée en dizaine de mètres.

21 sondages se groupent dans la région de la Manouba. La fig. 18 les situe avec leurs profondeurs arrondies. 12 atteignent ou dépassent 100 m, parmi eux les 7 entrepris récemment par la Direction des travaux publics vont de 200 à 600 m.

COUPES LITHOLOGIQUES DES SONDAGES. — Les sondages sont décrits dans l'ordre de leur numéro de classement au B. I. R. H. Ils sont accompagnés de quelques renseignements techniques ou géologiques. Fréquemment il s'agit de travaux anciens, qui n'ont pas été suivis par un spécialiste dans le cas des ouvrages privés, on est alors contraint à utiliser des descriptions qui font appel à des termes mal appropriés. Pour les ateliers « Rotary » les coupes lithologiques sont déduites de l'examen des « cuttings », il peut y avoir aussi manque de précision dans les cotes ou même dans la figuration du sol. En effet, au cours de la remontée les argiles peuvent disparaître, se trouver éliminées en même temps que les boues, et les sables se trouver représentés avec une

prépondérance qu'ils n'ont pas en réalité. En outre la grosseur des galets qui peuvent être déplacés varie avec la force de l'injection, différente suivant le matériel employé, et ne renseigne qu'imparfaitement sur l'aspect plus ou moins détritique des formations recoupées. Le sondage 6626 en carottage continu a apporté des précisions sur ces deux points. Pour toutes les coupes, le zéro est pris à l'orifice du trou.

Sondage n° 4. Exécuté de mai à juin 1931 à Bordj Chakir par la Société tunisienne de sondage-injection-forage (S. I. F.), entreprise en Tunisie de M. Lenain, rattachée à la Société française Bachi. Profondeur totale : 111 m.

de	0	à	16,50 m	— grès jaune	=	16,50 m
	16,50	à	31,20	— marnes	=	14,70
	31,20	à	34	— grès jaune	=	2,80
	34	à	37,50	— sable rouge	=	3,50
	37,50	à	40	— galets	=	2,50
	40	à	42	— grès jaune	=	2
	42	à	48	— grès fins blancs	=	6
	48	à	51	— grès jaune	=	3
	51	à	53,50	— grès brunâtre	=	2,50
	53,50	à	57,50	— argile tendre	=	4
	57,50	à	66	— marnes dures blanchâtres contenant du sable	=	8,50
	66	à	68	— argile	=	2
	68	à	81,50	— marnes dures foncées	=	13,50
	81,50	à	91,50	— argile tendre	=	10
	91,50	à	94,80	— grès gris argileux	=	3,30
	94,80	à	100,50	— marnes sableuses	=	5,70
	100,50	à	106	— argile sablonneuse, argile blanche, grès rouge	=	5,50
	106	à	111	— marnes grises	=	5

Signalons à propos de ces coupes données par des sondeurs que ceux-ci appellent « marnes » les argiles durcies et « argiles » celles qui sont restées plastiques, sans s'occuper de la teneur en calcaire.

Sondage n° 358. C'est un petit ouvrage exécuté pour les besoins domestiques de l'Institut Arloing. Cette fondation est construite sur une éminence formant un léger relief entre Le Bardo et la rive nord de la sebkra. Profondeur totale : 25,20 m.

de	0	à	4,10 m	— terre argileuse et gravillons (sol végétal)	=	4,10 m
	4,10	à	13,20	— argile plastique	=	9,10
	13,20	à	17,50	— sable argileux et gravillons	=	4,30
	17,50	à	20,50	— sable légèrement argileux	=	3
	20,50	à	20,70	— grès	=	0,20
	20,70	à	22,90	— argile	=	2,20
	22,90	à	25 20	— sable et eau	=	2,30

Sondage n° 1636. Exécuté en juin 1942 au fond d'un puits pour le compte de la ferme Morana. Profondeur totale 99,50 m. La coupe débute à la base du puits qui atteignait déjà 26,50 m.

de	26,50	à	33,25 m	— argile rougeâtre	=	3,75 m
	33,25	à	34	— argile un peu sableuse	=	0,75
	34	à	58	— argile rouge compacte avec nodules de tuf	=	24
	58	à	66	— argile rougeâtre et grise	=	8
	66	à	69,30	— argile grise	=	3,30
	69,30	à	69,50	— grès très dur	=	0,20
	69,50	à	87	— argile jaune	=	17,50
	70	à	88	— argile rougeâtre	=	18
	88	à	94,50	— alternance de grès et de sable	=	6,50
	94,50	à	97,45	— sable	=	2,95
	97,45	à	99,50	— argile grise et jaune	=	2,05

Sondages n^{os} 3621, 3622 et 3623. Ils font partie d'une série effectuée en 1912 par une entreprise dite « Société d'études de l'adduction des eaux de la Medjerda » (Projet minier d'adduction des eaux de la Medjerda) qui se proposait d'envoyer les eaux de la Medjerda dans la Sebkra Sedjoui. Sans s'en douter, ses protagonistes tentaient de recréer l'ancienne vallée de Tunis et voulaient reconnaître le terrain à travers lequel passerait la galerie.

N^o 3621. Profondeur : 29 m. Cote du sol à l'orifice mesuré par profil spécial : 45,16 m.

de 0	à 7 m	— argile et tuf	= 7 m
7	à 16	— argile rouge avec petits nodules de tuf	= 9
16	à 29	— argile rouge	= 13

N^o 3622. Profondeur : 29 m. Cote de l'orifice : 44 m.

de 0	à 26 m	— argile compacte	= 26 m
26	à 29	— argile rougeâtre et petits graviers	= 3

N^o 3623. Profondeur : 18 m. Cote de l'orifice : 38 m.

de 0	à 18 m	— argile et tuf	= 18
------	--------	-----------------	------

Sondage n^o 4364. Exécuté du 31 août au 27 septembre 1944 au fond d'un puits dans la propriété Camoletti au Bardo. Profondeur totale : 44 m. Profondeur du puits : 23,70 m.

de 23,70	à 24,40 m	— sable argileux	= 0,70 m
24,40	à 29,40	— argile rose sablonneuse	= 5
29,40	à 33	— argile vert pâle avec traînées blanches	= 3,60
33	à 36	— argile jaune rougeâtre	= 3
36	à 37,60	— sable fin très argileux	= 1,60
37,60	à 37,80	— grès tendre	= 0,20
37,80	à 41	— sable avec minces intercalations gréseuses	= 3,20
41	à 42	— grès assez dur	= 1
42	à 44	— sable un peu gréseux.	= 2

Sondage n^o 4365. Exécuté du 25 février au 21 mars 1944 au fond d'un puits dans la propriété Léonardis à la Manouba. Profondeur totale : 50,10 m. Profondeur du puits : 37 m.

37	à 39,60 m	— argile	= 2,60 m
39,60	à 42,10	— grès	= 2,50
42,10	à 43,60	— sable légèrement argileux	= 1,50
43,60	à 44,10	— argile sableuse	= 0,50
44,10	à 48,60	— sable légèrement argileux	= 4,50
48,60	à 50,10	— argile	= 1,50

Sondage n^o 4366. Exécuté en 1944 au fond d'un puits dans la propriété Agostini à la Manouba. Profondeur totale : 48,45 m. Profondeur du puits : 40 m.

de 40	à 43 m	— argile sablonneuse	= 3 m
43	à 45	— sable argileux	= 2
45	à 46	— sable fin	= 1
46	à 48,45	— grès blanc et graviers	= 2,45

Sondage n^o 4726. Exécuté du 28 mai au 3 septembre 1945 par la S. I. F. avec une machine type « BY » au fond d'un puits dans la propriété Ladjimi à la Manouba. Profondeur totale : 92 m. Profondeur du puits : 33 m.

de 33	à 85,50 m	— argile	= 52,50 m
85,50	à 86	— grès	= 0,50
86	à 90,50	— sable	= 4,50
90,50	à 92	— argile	= 1,50

Sondage n° 5439. Ce sondage a été foré pour le compte de la Tannerie de la Manouba (propriété La Casinière) du 27 février au 1^{er} juin 1947, par la S. I. F. avec un appareil « Rotary ». Il a été surveillé par l'administration des Travaux publics. Il porte l'indicatif « Manouba I ». Profondeur atteinte : 302 m.

de 0	à 1 m	— terre végétale	= 1 m
1	à 8,88	- tuf	= 7,88
8,88	à 12,79	— argile blanche	= 3,91
12,79	à 15,67	— tuf	= 2,88
15,67	à 16,37	— calcaire tendre	= 0,70
16,37	à 24,50	— argile rouge à passées gréseuses	= 8,13
24,50	à 28,40	— argile jaune à éléments grossiers	= 3,90
28,40	à 37,70	- argile gréseuse jaunâtre	= 9,30
37,70	à 39,60	— argile jaunâtre gréseuse	= 1,90
39,60	à 41,70	— argile un peu sableuse	= 2,10
41,70	à 52,50	— argile rouge compacte	= 10,80
52,50	à 90	— sable gravillonneux à petites passées gréseuses	= 37,50
90	à 93,70	— sable rougeâtre	= 3,70
93,70	à 97,70	— argile sableuse	= 4
97,70	à 104,47	— sable grossier	= 6,77
104,47	à 112	— argile jaune	= 7,53
112	à 119	— grès sableux	= 7
119	à 125,14	— argile jaune	= 6,14
125,14	à 139,65	— sable fin à passées gréseuses	= 14,51
139,65	à 150	— argile rouge	= 10,35
150	à 165,90	— argile sableuse et gréseuse avec des coquilles d' <i>Helix</i>	= 15,90
165,90	à 175,50	— argile grise compacte	= 9,60
175,50	à 177,92	— sable coquillier	= 2,42
177,92	à 180	— argile compacte jaune	= 2,08
180,20	à 189	— sable argileux	= 8,80
189	à 193	— argile sableuse	= 4
193	à 196	— sable fin	= 3
196	à 199,47	— argile grise	= 3,47
199,47	à 216	— sable fin	= 16,53
216	à 221	— argile grise compacte	= 5
221	à 224,50	— sable	= 3,50
224,50	à 227	— argile grise	= 2,50
227	à 227,60	— grès	= 0,60
227,60	à 261	— argile grise compacte avec quelques passées grésos-sableuses	= 33,40
261	à 302	— argile compacte sableuse	= 41

Sondage n° 5457. Exécuté du 11 octobre au 26 novembre 1944 au fond d'un puits dans la propriété Ben Mansour au Bardo. Profondeur totale : 42,50 m. Profondeur du puits : 32,50 m.

32,50	à 34 m	— argile grise graveleuse	= 1,50 m
34	à 36,50	— argile bleue légèrement graveleuse	= 2,50
36,50	à 39,50	— marne bleue (argile compacte)	= 3
39,50	à 42,50	— argile jaune	= 3

Sondage n° 5936. Conformément au programme établi à la suite du sondage « Manouba I », la Direction des travaux publics a fait effectuer ce deuxième sondage « Manouba II ». Comme le précédent il a été exécuté par la S. I. F. avec un appareil « Rotary » du 14 juillet au 12 août 1947. Il a été carotté électriquement par la Compagnie générale de géophysique. Il est actuellement rebouché. Profondeur totale : 404 m.

de 0	à 5 m	— terre végétale et marnes vaso-sableuses	= 5 m
5	à 27	— argile gris bleu sableuse	= 22
27	à 48	— argile bleue plastique avec gypse	= 21

48	à 51	m	— argile compacte gris bleu avec gypse	=	3	m
51	à 58		— argile foncée avec rognons de grès	=	7	
58	à 61,10		— argile blanche	=	3,10	
61,10	à 74		— argile rouge	=	12,90	
74	à 80,90		— argile jaune	=	6,90	
80,90	à 156,25		— argile rouge compacte	=	75,35	
156,25	à 160,20		— grès et sable	=	3,95	
160,20	à 227		— argile rouge compacte	=	66,80	
227	à 236,50		— argile rouge jaunâtre	=	9,50	
236,50	à 247,70		— grès et sable avec gypse	=	11,20	
247,70	à 252,80		— argile rouge et grisâtre	=	5,10	
252,80	à 262,10		— argile grise compacte	=	9,30	
262,10	à 266		— argile sableuse	=	3,90	
266	à 299		— argile grise	=	33	
299	à 312		— argile grise sableuse	=	13	
312	à 332		— argile grise rougeâtre	=	20	
332	à 344		— argile grise rougeâtre sableuse	=	12	
344	à 349,36		— argile sableuse	=	5,36	
349,36	à 370		— argile rougeâtre	=	20,64	
370	à 388,60		— argile grise rougeâtre	=	18,60	
388,60	à 404		— argile grise sableuse	=	15,40	

Sondages n^{os} 6141 et 6141 bis. Le sondage de reconnaissance Manouba III a été effectué par les Travaux publics en 1948. Il a recoupé successivement deux niveaux aquifères superposés, les essais de débit provisoires ont révélé deux nappes intéressantes. Les services compétents décidèrent alors d'aléser le forage, de tuber, de crépiner et de développer la nappe inférieure. Pour la nappe supérieure, un deuxième sondage d'exploitation a été creusé à quelques mètres du premier. Ils portent respectivement les appellations Manouba III et Manouba IV. La profondeur du M III est de 305 m et celle du M IV de 201. Dans cette étude, ce sondage jumelé sera toujours compté pour un seul. Un groupe de pompes commun est installé entre leurs deux orifices, l'eau extraite alimente la commune de la Manouba. Les deux trous ont été exécutés par la S. I. F. avec un « Rotary ». J'ai suivi personnellement les travaux ; la coupe suivante est celle que j'ai relevée aux « cuttings ».

de	0	à	3,50	m	— terre végétale avec nodules de tuf	=	3,50	m
	3,50	à	5		— croûte	=	1,50	
	5	à	17		— argile altérée sableuse avec nodules de tuf (<i>limite inférieure du terrain altéré</i>)	=	12	
	17	à	29,50		— argile rougeâtre avec passées sableuses blanchâtres	=	12,50	
	29,50	à	53,60		— argile rougeâtre avec petits galets calcaires et siliceux	=	24,10	
	53,60	à	77,45		— argile rouge devenant très compacte, emballant à la base des rognons d'argile plastique bleuâtre ou rougeâtre	=	23,85	
	77,45	à	92,50		— argile rouge renfermant des galets très grossiers à la base	=	15,05	
	92,50	à	107,75		— sable fin et galets avec passées gréseuses	=	15,25	
	107,75	à	129,50		— argile brunâtre sableuse et terreuse avec passées gréseuses	=	21,75	
	129,50	à	148,50		— argile très plastique avec quelques passées de grès très dur	=	19	
	148,50	à	156		— petits bancs de grès alternant avec des couches d'argile	=	7,50	
	156	à	185,50		— argile grise plastique avec des galets	=	29,50	
	185,50	à	186		— grès très dur	=	0,50	
	186	à	209		— sable fin siliceux avec éléments détritiques calcaires, à la base, galets calcaires et siliceux	=	23	
	209	à	228,50		— argile brunâtre très plastique et très fluide	=	19,50	
	228,50	à	230		— grès très dur	=	1,50	
	230	à	236		— argile brunâtre très plastique	=	6	
	236	à	244		— grès jaune consolidé	=	8	
	244	à	301		— argile grise et brune plastique	=	57	
	301	à	305		— argile brune compacte	=	4	

Sondage n° 6150. Exécuté en 1944 au fond d'un puits dans la propriété Ladislas à Oued Lill. Profondeur totale : 62 m. Profondeur du puits : 31 m.

de 31	à 35	m — argile rose avec petits galets	= 4 m
35	à 42	— argile jaune avec « pierres bigarrées »	= 7
42	à 43	— argile rouge et gravillons calcaires	= 1
43	à 44	— argile rouge et galets	= 1
44	à 45	— argile rose avec gros galets	= 1
45	à 47	— argile rougeâtre légèrement sablonneuse	= 2
47	à 49	— argile rougeâtre avec marnes blanchâtres	= 2
49	à 50	— argile jaunâtre	= 1
50	à 51	— argile jaunâtre sablonneuse	= 1
51	à 52	— argile jaunâtre avec traces blanchâtres de gypse	= 1
52	à 55,70	— argile très rouge	= 3,70
55,70	à 62	— argile rouge avec petits galets	= 6,30

Sondage n° 6285. Le sondage de reconnaissance Manouba IV a été foré à grande profondeur. Il s'agissait pour la S. I. F. de « roder » à proximité de ses ateliers de Tunis un nouvel appareil « Rotary » de grande puissance qui devait travailler ultérieurement pour la S. O. R. E. M. I. T. dans l'extrême Sud : « un Mogul », machine entièrement montée sur camions automobiles, il se singularise par son derrick simplifié.

La Direction des travaux publics était désireuse de poursuivre l'exploitation du sous-sol de la Manouba après le succès enregistré avec les sondages jumelés 6141. En fait, les essais effectués dans les niveaux de base ont été défavorables, par contre entre 150 et 200 m, un appoint intéressant a été découvert. Les services compétents ont alors décidé d'aléser, de tuber, crépiner et développer jusqu'à 200 m.

Cette reconnaissance profonde présentait un intérêt géologique particulier. J'ai suivi la marche des travaux. La Compagnie générale de géophysique chargée de la prospection électrique (procédé Schlumberger) a effectué en plus du carottage électrique, des mesures de thermométrie et trois mesures de pendage, qui ont porté sur les niveaux de base à faciès un peu schisteux que l'on supposait primitivement pouvoir être du Miocène ou de l'Auverisien. L'angle de pente a été trouvé chaque fois voisin de l'horizontale. J. Schijfsma a procédé aux analyses micropaléontologiques.

Profondeur totale : 623,50 m.

de 0	à 15 m	— recouvrement, argile sableuse avec tuf	= 15 m
15	à 25	— grès et tuf (<i>limite inférieure du terrain altéré</i>)	= 10
25	à 80	— argile rougeâtre avec des cailloutis au sommet d'importantes passées de « vase » plastique bleutée	= 55
80	à 110	— argile avec cailloutis, des bancs de grès et de conglomérat	= 30
110	à 120	— argile molle brunâtre et bleutée	= 10
120	à 140	— argile grise avec des cailloutis et des passées gréseuses	= 20
140	à 180	— sable grossier à galets alternant avec des lits d'argile et des passées gréseuses	= 40
180	à 197,50	— argile grisâtre un peu calcaire avec passées de grès et de conglomérat	= 17,50
197,50	à 198	— grès dur	= 0,50
198	à 204	— argile compacte grisâtre	= 6
204	à 206	— grès dur	= 2
206	à 221,50	— argile plastique bleue	= 15,50
221,50	à 225	— sable grossier et galets calcaires roulés	= 3,50
225	à 229,60	— argile bleue, argile grise et petits galets	= 4,60
229,60	à 243,50	— argile sableuse, argile plastique et galets	= 13,90
243,50	à 244,50	— sable grossier avec galets et passées gréseuses	= 1
244,50	à 256	— argile plastique et sable grossier rose avec quelques galets	= 11,50
256	à 357	— argile grisâtre pulvérulente parfois marneuse (effervescence à l'acide)	= 101
357	à 363	— sable argileux grisâtre avec galets	= 6
363	à 369,30	— argile gris jaunâtre avec passées bleutées et passées calcaires	= 6,30

369,30 à 499	m — sable argileux grisâtre avec galets et argile sableuse très compacte	= 129,70 m
499 à 540,20	— argile sableuse grise peu cohérente avec galets	= 41,20
540,20 à 623,50	— argile plastique un peu schisteuse avec passées sableuses et passées de galets ; la schistosité s'accroît vers la base ; l'argile devient très dure	= 83,30

Remarque : La grande puissance de l'injection a fait remonter dans les « cuttings » de gros galets. Ils sont constamment présents sur toute la hauteur de la coupe ci-dessus. Ce ne veut aucunement dire qu'il s'agisse de faciès plus grossiers que les précédents explorés par des moyens plus modestes.

Sondage n° 6292. Exécuté en septembre 1948 au fond d'un puits dans la propriété Guillon à Lalla Manoubia par la Société Brochot et Cie. Profondeur totale : 94 m. Profondeur du puits : 39 m.

de 39 à 40,50 m	— sable argileux avec rognons de grès	= 1,50 m
40,50 à 43	— sable et grès	= 2,50
43 à 45	— argile rougeâtre sablonneuse	= 2
45 à 73	— argile rouge très compacte et dure	= 28
73 à 73,80	— sable compact argileux rougeâtre	= 0,80
73,80 à 78,50	— sable gris fin	= 4,70
78,50 à 85,20	— sable moyen	= 6,70
85,20 à 92	— argile jaunâtre	= 6,80
92 à 92,50	— sable fin	= 0,50
92,50 à 94	— argile jaunâtre	= 1,50

Sondage n° 6342. Il existe à Tunis un projet d'urbanisme qui prétend construire au milieu de la sebkra, terrain évidemment bon marché. Un sondage de reconnaissance a donc été entrepris pour reconnaître les fondations en carottage continu, et les carottes extraites ont fait l'objet d'essais divers qui ont porté essentiellement sur les indices de liquidité et de plasticité (limites d'Atterberg), caractéristiques mécaniques des argiles.

La reconnaissance a été poussée jusqu'à 78 m toujours en carottage continu. Le sondage a été exécuté du 15 août au 9 novembre 1948 par la S. I. F. à la grenaille. J'ai examiné les carottes et J. Schijfsma s'est chargé de l'étude micropaléontologique. Il est un des rares en Tunisie à avoir exploré une sebkra (cf. les sondages de Zarsis).

Alluvions :

de 0 à 7,50 m	— sol de sebkra (argile plastique bleutée)	= 7,50 m
7,50 à 12	— argile grisâtre plastique avec rognons de gypse	= 4,50
12 à 16,40	— argile très gypseuse avec grands fers de lance	= 4,40
16,40 à 29	— sol de sebkra rougeâtre oxydé	= 13,60
29 à 32,30	— argile avec grands fers de lance et nodules de tuf	= 3,30
32,30 à 32,50	— croûte	= 0,20
32,50 à 33,50	— même sol de sebkra	= 1
33,50 à 35,50	— croûte	= 2
35,50 à 40,50	— même sol avec nodules de tuf	= 5

Éocène :

de 40,50 à 54,50 m	— calcaires et marnes	= 14 m
54,50 à 58,50	— gypse cristallisé dans les fissures calcaires	= 4
58,50 à 78	— calcaires et marnes avec <i>Anomalina grosserugosa</i> et petites Globigérines	= 19,50

On remarquera la faible épaisseur de la sebkra : 40 m.

Sondage n° 6626. Le sondage Manouba VI est une reconnaissance exécutée pour une part en carottage continu par les Travaux publics avec un « Core-Drill », du 24 août 1950 au 20 avril 1951. Profondeur : 197 m. J'ai relevé la coupe :

de 0 à 5,50 m	— sol avec nodules de tuf	= 5,50 m
5,50 à 21	— éboulis des collines des bordures : argile rose emballant des nodules d'argile verte	= 15,50

21	à	43 50 m	— limons avec petits galets de croûte roulés	=	22,50 m
43,50	à	44	— grès	=	0,50
44	à	96	— limons sableux avec galets de calcaire et de grès	=	54
96	à	102	— argile avec passées gréseuses	=	6
102	à	132	— argile bleue ou brune plastique	=	30
132	à	170	— argile sableuse avec passées de sable et bancs de grès durcis fissurés	=	38
170	à	197	— argile compacte brun sombre	=	27

Les passées gréseuses recoupées en carottage continu ont montré des pendages variant de 20 à 45°.

Sondage n° 6783. Le sondage Manouba VII est effectué au fonds d'un puits dans la propriété Cucciardi par un « Core-Drill » du 23 juillet 1951 au 19 février 1952. Profondeur : 152 m. J'ai suivi les travaux. Il est à proximité du Manouba VI et sa coupe est semblable quoique plus argileuse et avec des sables non cimentés.

LITHOLOGIE. — Une figure récapitulative permettra de comparer les coupes. La plupart des sondages ont été répartis sur un profil (fig. 19). Les cotes données pour chacun sont ramenées aux cotes topographiques avec le zéro défini par le niveau de la mer, d'où l'usage de cotes négatives. La principale difficulté réside dans le morcellement des couches détaillées, où des change-

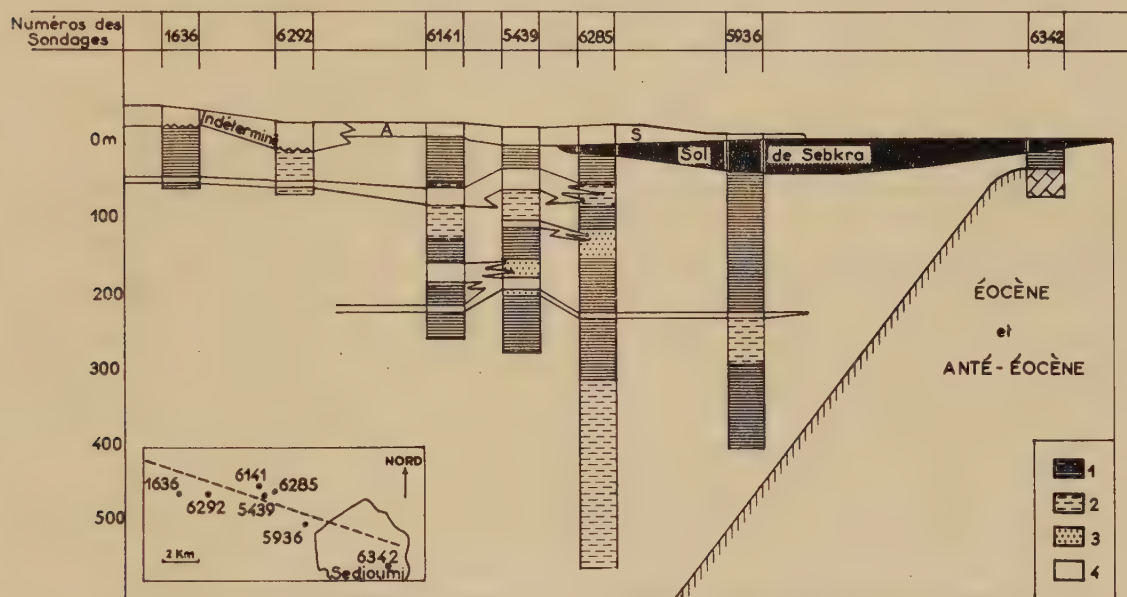


FIG. 19. — Profil stratigraphique de la subsidence « manoubienne ».

1 : argile compacte ; 2 : alternances d'argiles, de sables et de grès avec prédominance argileuse, ou argile sableuse ; 3 : alternances avec prédominance sableuse ou gréseuse, ou sable argileux ; 4 : sable ou grès. *Nota* : Les figurés sont choisis d'autant plus clairs que les faciès sont plus sableux. A S : zone d'altération superficielle.

Dans le cartouche, la direction du profil et la distribution géographique des sondages y figurant.

ments s'observent presque mètre par mètre. On a isolé, d'une part, les formations épaisses entièrement argileuses, d'autre part, celles entièrement sableuses ou gréseuses. Entre ces deux extrêmes on a distingué deux types d'alternances : celles à prédominance argileuse, celles à prédominance sablo-gréseuse. Les figurés utilisés choisis d'autant plus clairs que les faciès sont plus sableux traduisent graphiquement les indications compliquées des coupes.

L'argile prédomine largement. Les sables et grès se présentent comme des lentilles parfois anastomosées mais toujours isolées dans la masse argileuse. Les raccords en diverticules ne sont

pas une conception de l'esprit. On les observe dans les faciès fluviaux des collines mio-quaternaires, formées également d'alluvions de la Medjerda (fig. 20).

La lentille supérieure se suit très loin à l'E mais s'interrompt après le sondage 6141, au contraire la lentille profonde persiste. D'une façon générale les faciès deviennent de plus en plus argileux vers l'E.

Les schémas ne tiennent pas compte des pendages. Dans la direction N-S, les couches lenticulaires plongent vers le centre de la vallée. Dans la direction E-W, elles commencent à remonter vers la Barrière de Tunis en amont de la sebkra.

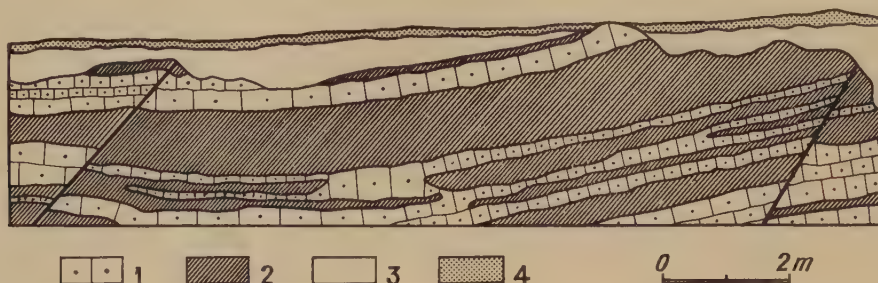


Fig. 20. — Variation des faciès dans une tranchée ouverte à l'Ariana dans le Mio-Quaternaire.

1 : grès ; 2 : argile ; 3 : zone altérée ; 4 : humus.

VARIATIONS CHIMIQUES ET DÉPLACEMENT DES EAUX AU SEIN DE LA ZONE DE SATURATION. — Les ingénieurs et après eux les hydrogéologues utilisent le terme « nappe » pour désigner l'eau d'un captage profond. Il est assez malheureux pour la zone de saturation, quand il s'agit plus précisément d'un courant au milieu d'un ensemble saturé à sa capacité maximum d'une façon homogène. On lui préférera le mot *drain*, tel qu'il a été expliqué p. 54. L'appellation est justifiée ici où alternent les sables et les argiles, puisque les expériences décrites plus haut ont montré que les argiles ne pouvaient pas servir d'écran contrairement à l'hypothèse classique, mais que les eaux des stratifications argileuses passaient au contraire dans les couches sableuses qui s'intercalent entre elles, à raison de 20 à 30 cm³/sec. de contact sable argile. D'après ces expériences, il semble que le rendement d'une surface de contact d'un hectare (200 à 300 l/sec.) suffise à assurer à lui seul l'alimentation de plusieurs sondages à gros débit.

Le drain est délimité par ses cotes supérieures et inférieures ; il est défini par la longueur de la crépine de captage qui détermine la zone de terrain drainé, ou, quand il s'agit d'essais préalables, par la distance isolée entre deux bouchons de ciment. Il correspond souvent à une des lentilles sablo-gréseuses mais peut excéder leur épaisseur, et peut également englober plusieurs passées sablo-gréseuses. On procède aussi à des essais de débit dans les zones à prédominance argileuse en espérant que des formations sableuses aient échappé à l'examen des « cuttings ». Les cotes des drains sont toujours arrondies.

Dans l'ensemble, le niveau statique des sondages est très voisin de l'altitude de la water-table, seulement un peu plus élevé dans le creux de la vallée.

INDÉPENDANCE ENTRE LES CARACTÈRES CHIMIQUES ET LES DRAINS SABLO-GRÉSEUX. — Les prélèvements d'eau ont été analysés. Le tabl. 6 indique à la fois les hauteurs de la colonne d'eau captée et les résultats de l'analyse. Les sondages qui ne dépassent que peu la water-table ont été éliminés, c'est-à-dire les sondages 358, 3621, 3622, 3623, dont le seul intérêt résidait dans les coupes qu'ils ont apportées, de même le 6150, sans eau profonde. L'analyse du sondage 1636 n'existe pas.

N° DU SONDAGE	PROFONDEUR DU DRAIN (en mètres)	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	CO ₃ mg/l	pH	DH	R. S. mg/l
4	— (15 à 20)	407	270	1915	3 194	1 316	240		208	7 360
4364	(0 à 10)	88	41	322	461	107	183	7,5	38	1 238
4365	— (10 à 0)	88	38	230	237	76	178	7,4	37	970
4366	— (10 à 0)	150	54	310	621	107	150	7,6	58	1 542
4726	— (60 à 65)	25	10	472	469	120	233	8,3	10	1 294
5439	— (100 à 120)	59	30	127	264	67	171	7,2	27	830
	— (130 à 165) 1	178	60	415	730	163	165	7,4	51	1 570
	— (130 à 165) 2	75	41	258	377	61	169	7,4	33	980
	— (165 à 220)	112	84	552	876	192	206	7,4	61	2 002
	— (220 à 230) 1	327	163	1 275	2 364	515	112	7,6	142	4 832
	— (220 à 230) 2	127	72	658	1 029	239	164	7,6	59	2 402
5457	— (15 à 20)	357	33	713	1 100	1 044	210	7,1	141	3 640
5936	— (25 à 65)	757	254	2 481	4 510	1 878	80	7,9	281	10 754
	— (185 à 200)	118	43	161	290	305	66	7,6	46	1 050
	— (215 à 275)	223	205	4 583	6 612	987	194	7,4	145	13 102
	— (275 à 325)	50	44	1 300	1 734	409	248	8,3	29	3 716
	— (325 à 375)	91	73	1 364	1 878	455	214	8,0	51	4 118
6141 bis	— (55 à 80) 1				298					898
	— (55 à 80) 2	95	34	216	319	55	168	7,6	37	880
	— (115 à 125)	55	25	170	222	133	139	7,5	23	790
6141	— (55 à 240) 1	98	46	241	355	194	195	7,2	42	1 110
	— (55 à 240) 2	102	43	253	346	142	186	6,9	42	1 040
6285	— (100 à 170) 1				398					1 140
	— (100 à 170) 2	46	26	329	333	109	222	7,4	22	1 116
6292	— (45 à 65)				558					1 386
6626	— (80 à 120)	90	39	241	337	49	192	7,1	38	1 000

TABL. 6. — Analyse des eaux prélevées par drains.

Pour plusieurs drains, il y a deux analyses notées 1 et 2. Sond. 5439 : 1, en début de pompage ; 2, après 2 h 30. — Sond. 6141 bis : 1, après 5 h de pompage ; 2, après 7 h. — Sond. 6141 : 1, après 5 h de pompage ; 2, après 10 h. — Sond. 6285 : 1, après 6 h de pompage ; 2, après 11 h.

En fin de pompage, la composition chimique se rapproche de celle de l'eau réellement incluse dans la roche, au début elle est encore polluée par des travaux de captage. On injecte en effet de la boue salée. Pendant l'exécution du 5439 par exemple, l'eau utilisée pour les boues provenait de puits dont les résidus secs respectifs étaient de 6 et 4 g par litre.

On voit donc généralement la salure diminuer à mesure que le pompage fait appel à des réserves plus lointaines. Quand l'écart est grand entre les résultats extrêmes il est logique de supposer que des diminutions de concentrations continueraient à se faire enregistrer et que la salure réelle est plus faible que celle observée en fin d'essais. C'est le cas du drain — 130 à — 165 du sondage 5439 qui a seulement fait l'objet d'un pompage de 2 h 30 en reconnaissance ; son résidu sec passe de 1 570 à 960 mg/l. De même le drain — 220 à — 230.

A partir du moment où l'influence des sels artificiellement introduits ne se fait plus sentir, il peut se produire à la suite d'un pompage prolongé des augmentations de concentration faibles. Après développement du sondage 6141 bis (drain — 55 à — 80), le chlore passe de 298 à 319 mg/l. C'est là une preuve indirecte du drainage de la roche-magasin argileuse par le drain sablo-gréseux. Quand les eaux du drain s'épuisent, elles sont remplacées par celles qui étaient renfermées dans les argiles et qui ont dissout une partie de leurs ions salins, suivant le processus observé dans les expériences de drainage où les eaux extraites des argiles par l'intermédiaire d'une couche sableuse entraînent avec elles des ions en solution.

Mais il est possible de préciser bien davantage et de montrer, en utilisant les diagrammes de H. Schoeller, qu'on ne peut pas distinguer de cloisonnement. Au contraire les résultats superposés le long de la coupe verticale, que donnent les sondages recoupant plusieurs drains, se présentent avec une homogénéité réellement parfaite. Soit :

— le sondage 6141 (fig. 21 A) : le parallélisme des segments de droite est pratiquement géométrique (avec toutefois une augmentation régulière de la proportion en milliéquivalents de SO_4) ;

— le sondage 5439 (fig. 21 B) : on remarquera le passage progressif de l'eau calcaire de la water-table à l'eau chlorosodique de la nappe la plus profonde — 160 à — 220. Le crochet formé par le segment joignant l'axe DH à l'axe Na s'atténue à — 100 m, disparaît à — 160 m, et l'angle devient concave à — 220 m.

Il devient manifeste que les drains n'introduisent aucune solution de continuité.

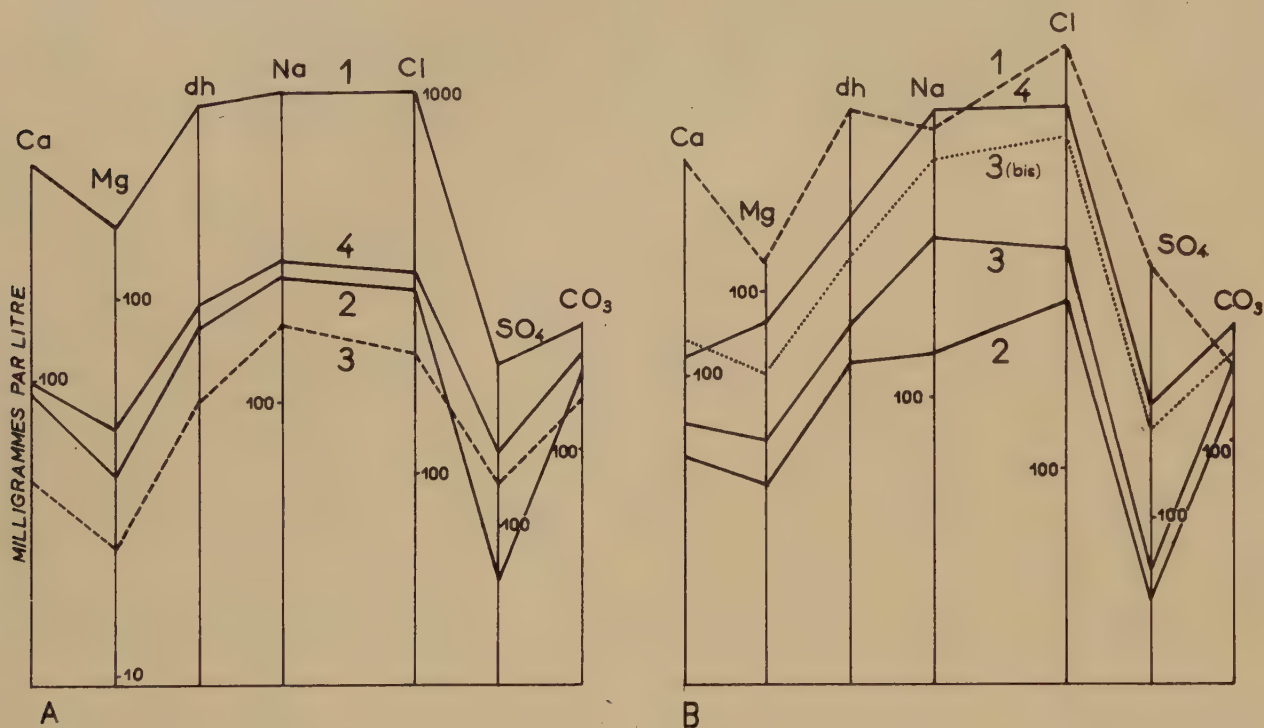


FIG. 21. — Variations chimiques affectant les eaux des « drains naturels » traversés par les sondages 6141 et 5439.

A : sondage 6141. 1 : water-table à l'emplacement du sondage ; 2 : drain de — 55 à — 80 m ; 3 : drain de — 115 à — 125 m ; 4 : drain de — 155 à — 240 m.

B : sondage 5439. 1 : water-table à l'emplacement du sondage ; 2 : drain de — 100 à — 120 m ; 3 : drain de — 130 à — 160 m (en fin de pompage) ; 3 bis : drain de — 130 à — 160 m (en début de pompage) ; 4 : drain de — 160 à — 220 m.

MOUVEMENT ASCENSIONNEL ET COUVERTURE SALÉE. — Au sein de la masse liquide la comparaison des résidus secs permet de déceler les courants.

Les salures décroissent avec la profondeur. C'est vers — 150 m qu'elles paraissent les plus faibles ¹. La fig. 22 montre l'ensemble de la structure. Les sondages y sont alignés grossièrement dans le sens E-W. Les sondages 5439 et 5936 se trouvent à l'intérieur d'une auréole plus centrale de la water-table. Elle fait ressortir la généralité du phénomène dans l'espace. Elle offre un inconvénient, elle procède par variations brusques et ne décrit pas le phénomène dans sa marche progressive. C'est à cet inconvénient que pallie le graphique de la fig. 23. Celui-ci complète en situant

1. L'eau du drain — 130 à — 160 du sondage 5439 est plus salée que celle réellement incluse dans la roche, le lavage ayant été insuffisant.

la profondeur où la concentration passe par un minimum ; cela a lieu entre — 120 et — 150 m ; c'est-à-dire près de 180 m en dessous de la surface du sol. L'échelle des concentrations a été choisie linéaire, ce qui à l'inverse des diagrammes logarithmiques fait ressortir l'importance de l'abaissement, mais par contre entraîne hors des limites de l'épure le figuré représentatif du sondage 5936. Une seule exception à cette règle : le sondage 6292.

L'accroissement vers les profondeurs est net pour le sondage 5439 ; pour le 6141, la remontée reste plus légère. Les courbes de *résistivité* et de *polarisation spontanée* du « Mogul » pourraient indiquer des salures plus élevées à partir de 500 m. Les régions abyssales surconcentrées, classiques dans les sondages pétroliers, ne sont pas atteintes.

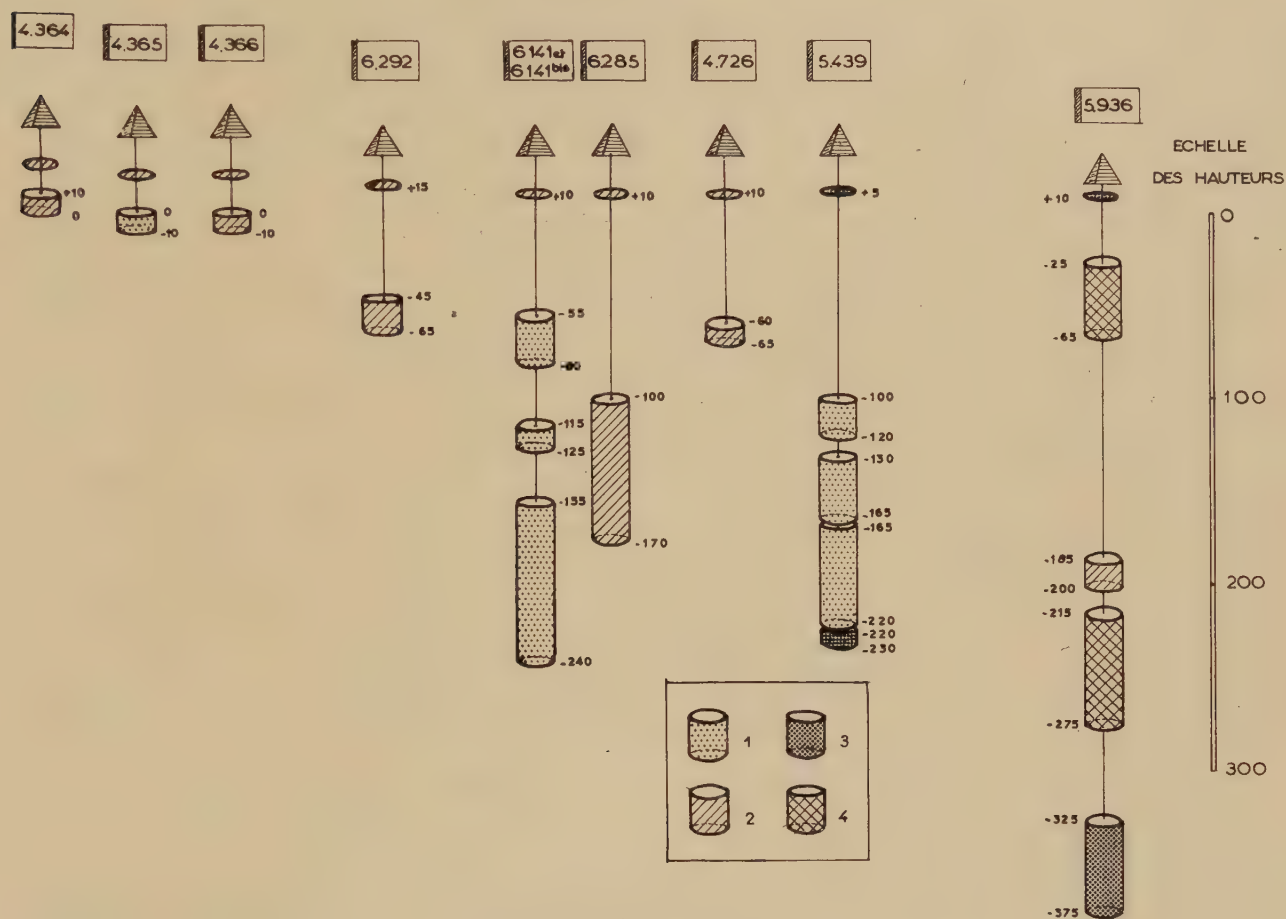


FIG. 22. — Concentration en sels dissous dans la zone de saturation.

La hauteur de chaque cylindre est proportionnelle à la longueur de la crépine des sondages en fonctionnement ou à l'épaisseur de la colonne d'eau étudiée au cours d'essais préalables. Les cercles renseignent sur la cote et la concentration de la water-table au voisinage des sondages.

1 : résidu sec < 1 g/l ; 2 : compris entre 1 et 2 g/l ; 3 : entre 2 et 4 g/l ; 4 : > 4 g/l.

Cet accroissement superficiel ménage une zone de moindre salure vers 200 m de profondeur qui est assez générale en Tunisie et paraît caractéristique du climat steppique. Les auteurs qui ont étudié les sondages sous cet aspect, sous d'autres climats, signalent au contraire une augmentation progressive régulière vers le bas. G. S. Rogers [1919] en particulier se basait sur des graphiques rassemblant des observations jusqu'à 21 000 pieds aux États-Unis. K. Katz [1928] donne un exemple très détaillé d'un accroissement indépendant des différenciations stratigraphiques dans la région carpathique de Boryslav.

ÉVAPORATION, INFILTRATION. — Normalement les terrains sont lessivés vers la surface. La couverture salée épaisse de près de 200 m et les déplacements ascensionnels ne peuvent résulter que de l'évaporation. Un spécialiste des questions d'irrigations avait pensé que leur développement assez récent à la Manouba pouvait étendre peu à peu les salures en profondeur. Mais les

diffusions sont des phénomènes lents et leur vitesse est fonction exponentielle des épaisseurs à traverser et n'auraient pas atteint 200 m en une cinquantaine d'années. D'ailleurs, la couverture salée apparaît générale dans toute la Tunisie. L'évaporation intensive si caractéristique de ce climat entraîne des répercussions de grande ampleur. Dans le Centre et le Sud tunisien, elle se fait même sentir jusqu'à 300 ou 400 m, mais n'aurait pas pu être interprétée comme à la Manouba par suite du manque de densité des sondages. C'est là un résultat assez inattendu, d'abord parce qu'on n'aurait pas attribué *a priori* une action aussi étendue à l'évaporation, également parce qu'elle s'effectue à travers des empilements sub-horizontaux, c'est-à-dire qu'elle prouve à nouveau des transmissions faciles au sein des roches-magasin argileuses.

Avec cette part prépondérante accordée à l'évaporation, une question se pose. Que devient l'infiltration ? A partir du moment où l'on découvre, inscrites dans le sol, les traces du passage des eaux d'évaporation, il faut s'inquiéter de ce que peuvent devenir les eaux de pluies, dont la pénétration en profondeur devrait s'accompagner d'une diminution de salure.

Sous certains plateaux alluviaux ménagés entre les « horst » de la dorsale tunisienne, où l'on a observé la même couverture salée, les eaux de pluies pourraient s'infiltrer directement en profondeur en bordure des massifs calcaires ou gréseux, tandis qu'au centre elles s'évaporeront avant d'atteindre la water-table. De même à Gueniche, près de Bizerte, les eaux profondes sont supposées s'infiltrer dans les dunes bordant la plaine [Archambault, 1947]. Ici il est impossible de

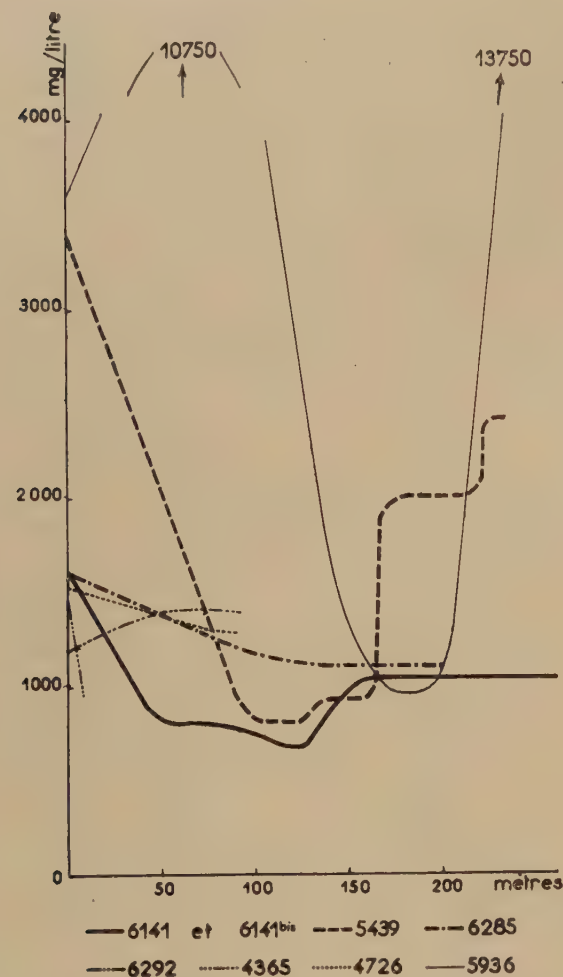


FIG. 23. — Graphique montrant les variations de la composition en sels dissous en fonction de la profondeur.

En abscisses : les profondeurs en mètres ; en ordonnées : les résidus secs en mg/l (la water-table est portée conventionnellement à la profondeur 0). Les numéros sont ceux des sondages de la Manouba-Sedjoumi, dans lesquels les analyses des eaux prélevées à différentes profondeurs ont servi à établir le graphique.

s'expliquer la localisation des zones d'infiltration privilégiées, et je crois qu'il faut avancer une explication d'ordre plus général. L'eau de pluie reçue par le sol est appelée d'abord à évoluer dans la zone d'aération. La force de la pesanteur l'incite à descendre, les forces capillaires et l'évaporation la retiennent. Une partie est utilisée par les Végétaux dans un cycle de surface ; la partie qui atteint enfin la water-table ou, pourrait-on dire, celle qui se sédimente, a reçu depuis longtemps sa part des sels représentés dans le sol à cet endroit et sa composition chimique est identique à celle de l'eau qu'elle rejoint.

INFLUENCE LOINTAINE DE L'OMBILIC. — En profondeur, la salure s'accroît également vers l'aval, comme le montre le stéréogramme de la fig. 24. Cet accroissement pourrait résulter en partie d'une diffusion des ions salins de la surface vers le fond, mais dans la mesure où les accroissements de salure traduisent effectivement des déplacements des eaux, ce phénomène montre l'existence en profondeur de courants ascensionnels ; les eaux convergent en somme vers l'ombilic dans les trois dimensions. Que ces salures résultent d'une simple diffusion des ions ou au contraire d'un appel des réserves profondes vers la zone d'évaporation, elles montrent de toutes manières les répercussions souterraines de l'existence d'un ombilic. Dans le cas présent, comme la sebkra

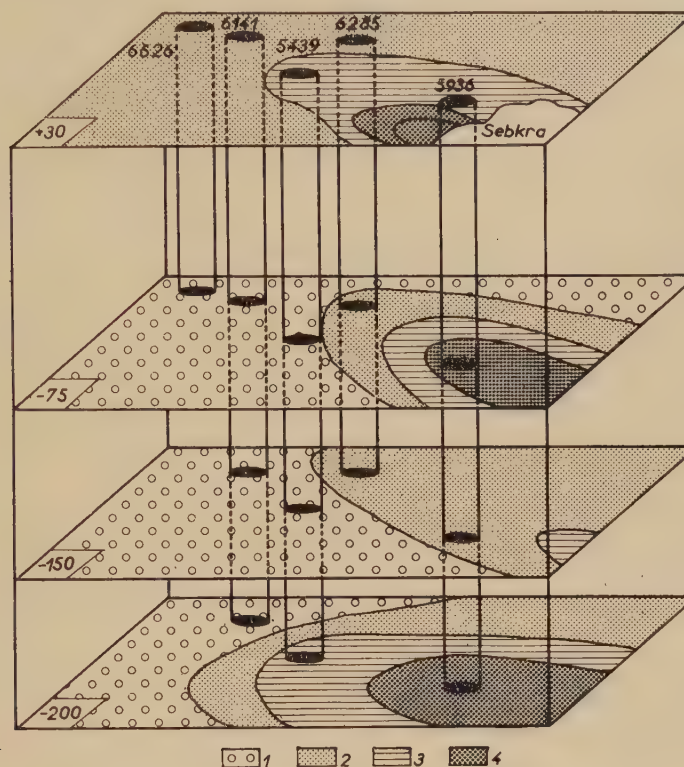


FIG. 24. — Bloc-diagramme.

1 : salure < 1 g/l ; 2 : comprise entre 1 et 2 g/l ; 3 : entre 2 et 4 g/l ; 4 : > 4 g/l.

est située au bord d'une cuvette synclinale, les pendages ne peuvent que faciliter la remontée des eaux vers elle.

Indépendamment d'ailleurs des phénomènes d'évaporation, l'eau peut être plus salée en aval, en partie aussi parce que les faciès deviennent plus argileux.

PRINCIPE D'UNE EXPLOITATION HYDRAULIQUE PAR SONDAGE. — Quand une zone favorable a été reconnue par examen des « cuttings », du carottage électrique, et par un captage d'eau préliminaire, le trou du sondage est tubé et crépiné. Après quoi, dans des formations sablo-argileuses ou grés-argileuses, il est nécessaire de *développer*, c'est-à-dire que l'on injecte du gravier jusqu'à obtenir une eau parfaitement limpide. A ce moment la crépine est entourée d'un massif filtrant important. On a donc ajouté un drain artificiel au drain naturel. Les rapports entre le drain artificiel et le drain naturel déterminent la durée du développement ; il est d'autant plus long que la granulométrie du drain naturel est plus fine. Le développement

du Manouba IV a demandé plusieurs mois, celui du Manouba VI a été abandonné car la limpidité de l'eau ne s'est pas améliorée après deux mois. Quand le développement est achevé, on peut considérer que le rendement du drain artificiel n'introduit plus guère de pertes de charge, et le débit du sondage dépend seulement du rendement du drain naturel.

Il reste encore les pertes de charge dans le tube. On entend par *capacité spécifique* d'un sondage le rapport $\frac{\text{débit (en l/sec.)}}{\text{abaissement (en m)}}$ qui élimine l'influence de la pompe. Le tabl. 7 assemble deux choses non comparables entre elles : des essais de reconnaissance avant développement dans des drains naturels non captés ultérieurement parce que mauvais ; des débits d'ouvrages équipés de leur drain artificiel.

N° DU SONDAGE	PROFONDEUR (en mètres)	ESSAIS DE RECONNAISSANCE OU ESSAIS DÉFINITIFS APRÈS CRÉPINAGE ET DÉVELOPPEMENT	DÉBIT l/sec.	ABAISSE- MENT (en mètres)	CAPACITÉ SPÉCIFIQUE
6141 bis	— (55 à 80)	définitifs	56	32	1,75
	— (115 à 125)	définitifs	56	32	1,75
6141	— (155 à 240)	définitifs	26	32	0,81
5439	— (100 à 120)	définitifs	13	33	0,39
	— (130 à 165)	reconnaissance	1,25	5,30	0,24
	— (165 à 220)	reconnaissance	1	4,30	0,25
	— (220 à 230)	reconnaissance	0,125	6	0,02
5936	— (25 à 65)	reconnaissance	0,20	20,50	0,01
	— (185 à 200)	reconnaissance	0,16	10,40	0,015
	— (215 à 275)	reconnaissance	0,8	18,50	0,05
	— (275 à 325)	reconnaissance	2	22	0,09
	— (325 à 375)	reconnaissance	1,6	22	0,08
6285	— (100 à 170)	définitifs	31	24	0,76
4726	— (60 à 65)	définitifs	8	63	0,13
6292	— (45 à 65)	définitifs	11,5	11	1

TABL. 7. — Capacités spécifiques.

La capacité spécifique en puits développés caractérise le rendement du drain naturel. Mais celui-ci est fonction du volume et par suite de l'épaisseur traversée. La capacité caractéristique élimine l'influence de l'épaisseur. C'est le rapport de la capacité spécifique sur l'épaisseur de la nappe captée mesurée en mètres. On peut dire qu'elle caractérise quantitativement le rendement d'un volume unitaire de drain. On ne peut l'établir ici d'une façon intéressante que pour les cas où l'épaisseur de la crépine coïncide avec une zone sablo-gréseuse sans alternance, soit les quatre données ici (tabl. 8).

N° DU SONDAGE	PROFONDEUR (en mètres)	CAPACITÉ SPÉCIFIQUE	ÉPAISSEUR DU DRAIN (en mètres)	CAPACITÉ CARACTÉRISTIQUE
6141 bis	— (55 à 80)	1,75	25	0,07
5439	— (100 à 120)	0,39	20	0,02
4726	— (60 à 65)	0,13	5	0,03
6292	— (45 à 65)	1	20	0,05

TABL. 8. — Capacités caractéristiques.

Pour les sondages qui ont permis ce calcul, les nouvelles valeurs trouvées diminuent les différences des rapports des capacités spécifiques entre elles. Une moyenne se dégage. Cependant les deux drains remarquables par leur forte capacité spécifique conservent une capacité caractéristique plus élevée. Ce sont les drains — 55 à — 80 du sondage 6141 *bis* et — 45 à — 65 du sondage 6292. Les capacités spécifiques, tout en exagérant trop les écarts, conservent leur valeur. Les capacités spécifiques et surtout les capacités caractéristiques dépendent exclusivement des particularités des terrains.

Le rendement du drain naturel déterminé par la capacité caractéristique dépend d'une part des pertes de charge dans cette conduite naturelle, d'autre part de son alimentation. Dans notre exemple de la Manouba-Sedjoumi où les drains sont des lentilles, l'alimentation provient exclu-

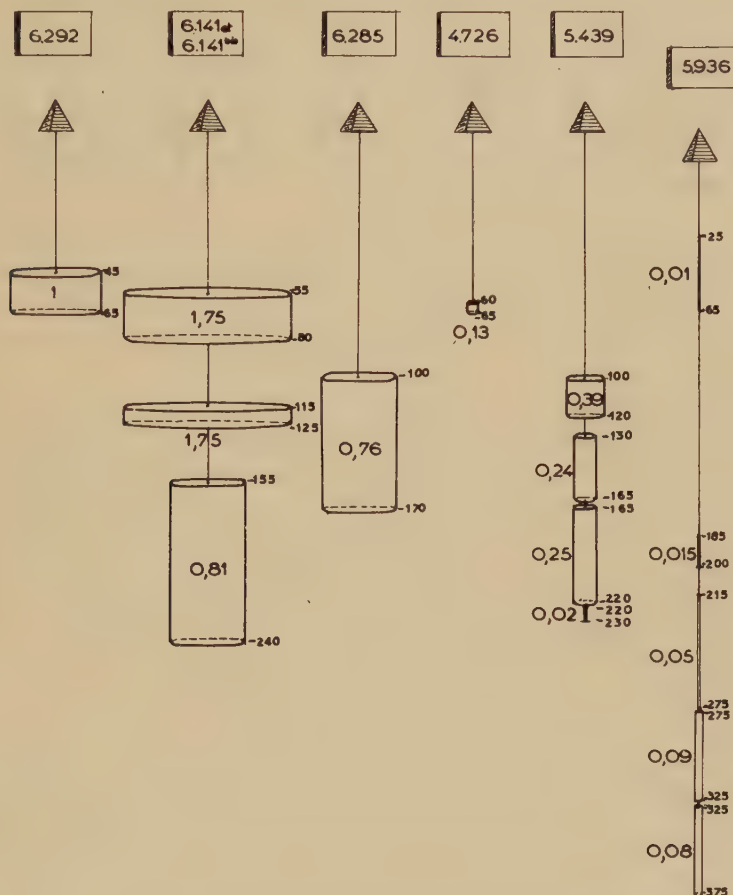


FIG. 25. — Capacité spécifique des principaux sondages.

Le diamètre des cylindres est proportionnel à la capacité spécifique, leur hauteur représente l'épaisseur des drains. Les valeurs sont exprimées en l/sec. par m d'abaissement.

sivement du drainage de la roche-magasin. C'est un cas absolu de drainage de roche-magasin fine, par un drain dont les sections des vides autorisent une vitesse de circulation suffisante. Le drain naturel permet d'imprimer une accélération à l'eau des réserves. Toutes choses égales d'ailleurs, la salure des eaux augmente quand la granulométrie devient plus fine, ce qui montre leur origine car les argiles salent les eaux. On le verra en comparant la fig. 22 avec la fig. 25 qui donne une vue synthétique difficile à dégager du tableau des capacités spécifiques.

D'une manière générale, le rendement du sondage dépend en définitive du rendement du drain naturel capté, la pluviométrie ou les venues latérales n'interviennent que secondairement. Elles n'ont une réelle importance que lorsque le rendement est très bon, car en leur absence l'exploiti-

tation finirait par faire baisser la water-table, et par suite la pression hydrostatique nécessaire au drainage des argiles diminuerait aussi. Toutefois, étant données les réserves immenses contenues dans les marnes et les argiles, ceci ne pourrait se produire que si l'eau était extraite en grande abondance, puis évaporée sur place ou emmenée au loin.

Il existe une importante réalisation de captage profond, en cours dans le département d'Oran. De grands travaux se préparent à transporter les ressources du bassin endoréique du Chott Chergui pour irriguer les plaines paraliques. A ce propos certains spécialistes ont suivi pendant des années l'évaporation à la surface de l'ombilic, car ils pensaient évaluer ainsi les ressources utilisables. Il semble qu'il se soient livrés à un travail qui n'était pas utile, car un captage sous la water-table ne diminuerait sûrement en rien l'évaporation superficielle, et son rendement dépendra d'abord de la disposition des drains.

Les considérations précédentes suffisent parfaitement à expliquer les résultats fréquemment heureux des sondages hydrauliques profonds en climat aride car l'aridité n'a pour seul effet que l'abaissement de la cote de la water-table, en dessous de laquelle n'existent comme ailleurs que des roches saturées d'eau.

IV. Aspect général de la sédimentation fluviatile manoubienne.

Les croûtes calcaires (répartition des zones du dépôt calcaire en bassin endoréique). — La sédimentation détritique de la Medjerda.

LES CROÛTES CALCAIRES. — La sédimentation fluviatile manoubienne est constituée du matériel détritique transporté dans la Medjerda, mais elle est aussi caractérisée par les sels authigènes laissés lors de l'écoulement des eaux continentales. J'étudierai d'abord ces sels authigènes. Les plus remarquables sont les croûtes calcaires, qui ont pu trouver des conditions favorables à leur développement dans de vastes territoires d'Afrique du Nord. Formations de surface ou *sol*, leur étude ressort plutôt des disciplines pédologiques, et je ne présenterai que quelques remarques, d'une part, en ce qui concerne leurs relations avec l'évaporation, d'autre part, au sujet de la répartition des dépôts calcaires dans un bassin endoréique.

En 1889, A. Pomel a pensé expliquer les croûtes par des remontées capillaires et des évaporations d'eau. Depuis l'idée serait couramment admise si une petite controverse n'avait eu lieu en 1947-1948. G. Gaucher [1947], s'inspirant de considérations plus pédologiques, pense que la croûte qu'il a appelée *croûte zonaire* à cause de son aspect rubané n'a pu se former que par un lessivage des carbonates du sol et qu'elle provient par conséquent d'un ruissellement. Soit une formation *per descensum* opposée à la formation *per ascensum* de Pomel. Mais il introduit un élément de confusion parce qu'il ne paraît pas croire que le carbonate de calcium en solution dans les eaux est indépendant des massifs calcaires. Tandis que J. Flandrin, M. Gautier et R. Laffitte [1948] reviennent aux notions classiques d'évaporation.

Au sujet de l'évaporation, j'ai déjà montré son importance dans les caractères du climat nord-africain (p. 16 et suiv.) ; j'ai pu apporter aussi des précisions nouvelles sur la façon dont l'évaporation pouvait entraîner une remontée du calcaire dissous dans les eaux de la zone de saturation. L'enrichissement en Ca^{++} est régulier et progressif depuis la zone lessivée de — 200 m jusqu'à la water-table, comme il apparaît en groupant les analyses des sondages. L'importance des variations observées dans les analyses décèle une différenciation prononcée. Ce sont des masses minérales considérables que les eaux mettent en mouvement et parviennent à déplacer.

Dans les régions superficielles du sol, ce transport peut entraîner des phénomènes actuels, qui ont un dépôt calcaire pour résultat. Le Ca^{++} en solution monte jusqu'à la water-table, mais

là, la concentration reste généralement insuffisante pour provoquer la précipitation fractionnée sous forme de CO_3Ca . Après avoir été rassemblé depuis les profondeurs, c'est dans la zone d'altération qu'il pourra cristalliser.

J'avais communiqué [1950] quelques observations qui ne se rattachaient pas encore à la croûte, mais d'abord aux nodules de tuf généralement présents dans les sols nord-africains. Elles furent effectuées surtout dans les tranchées argilo-sableuses et argilo-gréseuses de l'Ariana. Dans l'argile, il se produit un double processus, mécanique et chimique : mécaniquement, de profondes fissures verticales descendent très bas, découpant le terrain en place, et plus haut la masse est fendillée par un réseau de très fines fentes dont la densité augmente vers le haut ; chimiquement, le long des fissures se dépose un revêtement blanc de calcaire très tendre, le tuf ; il remplit également les solutions de continuité entre les strates de grès et d'argile. Plus haut, quand la roche altérée en détail est assez fendillée, il s'y forme des nodules dont la grosseur varie de celle d'une tête d'épingle à celle des poings ; ils affectent des formes irrégulières simulant les poupées du loess avec des apophyses rappelant les angles des fentes qui leur ont donné place ; leur zone de densité maximum est irrégulièrement disposée, généralement vers 30 ou 40 cm de profondeur. La « torba » ou croûte naissante de H. Schoeller [1939], assez fréquente dans les environs, manquait à l'emplacement des tranchées.

Les observations effectuées dans les tranchées se rattachent aux mouvements verticaux des eaux dans la zone d'altération. Pendant les périodes pluvieuses, l'argile reçoit les précipitations ; le reste du temps elle est un lieu de passage pour les réserves de la zone de saturation soumises à une évaporation lente. Au cours de ces déplacements, l'argile alternativement gonflée et desséchée se fend. Les fentes deviennent des veines de circulation supracapillaires pour les eaux en cours de distillation, qui y abandonnent les sels calcaires dont elles sont chargées. Les composés plus solubles, sulfates et chlorures, sont redissous et lessivés par de nouvelles pluies.

Les bancs de grès découverts dans les tranchées ne forment pas de nodules, car ils contiennent moins d'eau que les argiles et la retiennent moins fortement. Par contre, ils sont incapables de protéger la couche sous-jacente comme le fait une épaisseur argileuse identique, et sous un banc de grès de 2 m on observe des argiles déjà assez fortement altérées, renfermant de nombreuses concrétions. En profondeur sous la water-table, les bancs de grès peuvent servir de voies à circulation rapide conduisant à la surface d'évaporation des eaux dont la concentration croissante dépasse le degré de solubilité du CO_3Ca , ce qui entraîne des altérations analogues dans les argiles voisines. J'ai pu le constater au cours des travaux de construction du barrage réservoir de l'Oued El Lill en Kroumirie, dans les alternances du Flysch oligocène. Le sable était exceptionnel dans les tranchées. Ceux rencontrés dans les couches superficielles au cours des sondages contiennent des concrétions visibles au binoculaire qui se sont formées dans les espaces libres entre les grains.

On doit alors découvrir un rapport entre l'altitude de la water-table et la position des nodules. Sans exception, dans toutes les coupes et les sondages qu'il m'a été donné d'observer en Afrique du Nord, les nodules caractérisent une altération qui débute au-dessus de la water-table. A la Manouba, la précision est de l'ordre du mètre.

Mais ces nodules, dont la formation résulte de phénomènes actuels, restent très éloignés des croûtes continues. Presque tous les auteurs admettent d'ailleurs que les croûtes épaisses n'ont pu se former qu'au Villafranchien ou au Quaternaire ancien, quoiqu'ils s'accordent assez mal sur leur âge exact. C'était déjà l'avis de A. Pomel, M. Gigout [1948 a] pense qu'elles sont *anté-flandriennes*. Pour G. Choubert et G. Bryssine [1946], la croûte marocaine date de l'*inter-pluvial Mendel Riss* (voir aussi Choubert [1948]). D'après E. Gobert [1948] il y a deux croûtes, dont l'une serait *capsienne*. G. Castany [1953 a] admet aussi deux croûtes, l'une *villafranchienne*, l'autre *moustérienne*.

J. Durand [1951], qui vient de consacrer aux croûtes une thèse d'ingénieur-docteur, distingue, d'une part les encroûtements, qui peuvent être calcaires ou gypseux, et la croûte zonaire de Gaucher d'autre part. Si, d'après lui, les encroûtements sont liés comme les nodules de tuf à des phénomènes d'évaporation, les croûtes zonaires constituant les grandes morphologies tabulaires nord-africaines et la hammadah saharienne résulteraient de ruissellement et dateraient du Villafranchien.

Je ne discuterai pas ces distinctions, encore qu'il y ait sans doute lieu de faire remarquer que la coexistence possible, dans le climat nord-africain actuel, d'un pouvoir évaporateur intense avec une forte hygrométrie puisse peut-être amener à reconsidérer dans certains cas la question du lessivage des sols enrichis en calcaire par l'évaporation. Je dirai simplement avec H. Schoeller [1944] que les encroûtements continus n'auraient pu se former à partir de « croûtes naissantes » d'évaporation, que si leur évolution s'était effectuée dans un sol parfaitement stable. Les croûtes naissantes sont des blocs aplatis, irréguliers, non jointifs, enfouis sous une couverture d'humus ou de limon épaisse de 20 cm à 1 m. Dans la région de Tunis, si les bassins de subsidence ont eu leurs sols remaniés sans cesse par le dépôt d'alluvions nouvelles, les croûtes calcaires ont sans doute pu trouver des conditions plus favorables à leur développement sur les aires en réaction anticlinale séparant les bassins synclinaux. En traitant la tectonique quaternaire, je montrerai que la présence d'encroûtements calcaires peut servir à caractériser certains plis anticlinaux récents affectant les formations alluviales.

RÉPARTITION DES ZONES DU DÉPÔT CALCAIRE EN BASSIN ENDORÉIQUE. — A la surface du bassin endoréique typique de la Manouba-Sedjoui, les nodules de tuf et les croûtes calcaires naissantes caractérisent les sols, qui correspondent à l'auréole calcaire déterminée d'après la chimie des eaux de la water-table. Les sols calcaires peuvent toutefois déborder légèrement vers la région où les eaux sont déjà sulfo-magnésiennes. En tous cas les terrains de l'auréole sulfo-magnésienne situés plus en aval ne contiennent que des cristallisations de gypse, tandis que l'ombilic chlorosodique est recouvert partiellement l'été d'une croûte mince de chlorure de sodium.

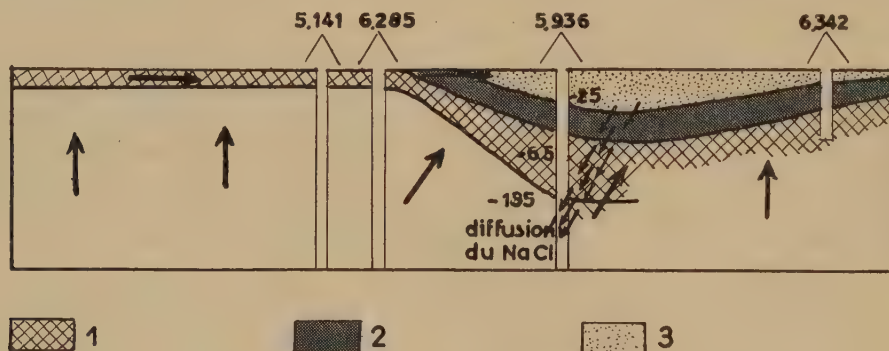


FIG. 26. — Répartition des sels authigènes dans le bassin endoréique de la Manouba.

1 : zone calcaire ; 2 : zone gypseuse ; 3 : zone chlorosodique.

Les sondages sont désignés par leur numéro d'ordre, les chiffres le long de la colonne du sondage 5936 rappelant les cotes des eaux analysées. Les grandes flèches indiquent le sens de la circulation de l'eau, les petites flèches le sens de la diffusion du NaCl.

Mais le fait nouveau a été observé lors du forage effectué dans la Sebkra Sedjoui. Celui-ci a traversé en effet une croûte épaisse de 2 m dans la zone de saturation, à 33, 50 m de profondeur. Il peut s'agir évidemment d'une vieille croûte recouverte par la sebkra transgressive. Mais il est plus vraisemblable qu'elle se forme actuellement au sein de la zone de saturation quand la concentration dépasse la solubilité du CO_2Ca et la capacité d'adsorption des argiles. Dans ces conditions d'immobilité parfaite et de constance physico-chimique, sa croissance peut être rapide. La coupe du sondage (voir p. 70) indique, au-dessous d'une croûte salée de quelques décimètres non notée, la zone gypseuse de 7, 50 à 32, 30 m et immédiatement en-dessous la croûte calcaire.

Il semble donc que les zones d'inégales répartitions des sels authigènes s'étagent également sur l'axe vertical et, parallèlement aux salures des eaux, convergent dans les trois dimensions vers l'ombilic. La fig. 26 tient compte en même temps de la subsidence qui enfonce les formations de sebkra et épaissit le noyau chlorosodique.

LA SÉDIMENTATION DÉTRITIQUE DE LA MEDJERDA. — Les remaniements endoréiques affectent un matériel allogène fluviatile, hydrolisats et résidus insolubles.

Il faut d'abord en déterminer la puissance à partir des sondages. Dans aucune des coupes examinées il n'a été possible de découvrir une différenciation lithologique quelconque permettant de le distinguer du cycle antérieur, le Mio-Quaternaire fluviatile des collines. On ne peut même assurer que le « Mogul » 6285 profond de 600 m l'ait recoupé ; le durcissement accompagné d'un certain délitage, visible à la base, est une transformation secondaire due en partie au poids des terrains supportés.

Les analyses micropaléontologiques n'ont été demandées que pour deux sondages, le 5439 Manouba I et le « Mogul ». C'est E. Schijfsma qui a bien voulu s'en charger. Il ne signale que des formes remaniées. A part trois espèces, il s'est arrêté d'ailleurs aux genres. Pour le 5439, deux carottes lui ont été soumises :

de — 124 à — 125 m. Age de la roche originelle : Maestrichtien.

<i>Globigerina</i>	<i>Uvigerina</i>
<i>Gümbelina</i>	<i>Nodosaria</i>
<i>Globotruncana marginata</i>	<i>Eponides</i>
<i>G. rosetta</i>	<i>Gaudryina</i>
<i>G. linnei</i>	<i>Lenticulina</i>
<i>Bulimella obtusa</i>	<i>Palmula reticulata</i>
<i>Globigerinella</i>	<i>Tristix</i> (fragments ?)
<i>Bolovina regulata</i>	Ostracodes
<i>Cibicides</i>	Épines d'Échinides

de — 274 à — 275 m. Age de la roche originelle : Aturien.

<i>Globotruncana linnei</i> (fréquent)	<i>Anomalina</i>
<i>Globotruncana arca</i> (rare)	<i>Globigerinella</i>
<i>G. rosetta</i> (rare)	<i>Globigerina</i>
<i>Gümbelina</i>	Quelques grains de lignite (?)
<i>Lenticulina</i>	Beaucoup de quartz.

Cette liste de genres remaniés, à défaut d'âge, confirme la formation par un transport fluviatile depuis les massifs crétacés du Constantinois et de Tebessa.

Pour le sondage « Mogul », à notre regret, E. Schijfsma ne nous a pas précisé les formes. Les neuf échantillons ont été prélevés au « cutting ».

de — 40 à — 35 m	: microfaune assez riche : formes aturiennes remaniées. Age : Quaternaire ou Pliocène.
— 130 à — 160	: microfaune assez riche : formes aturiennes remaniées. Age : Quaternaire ou Pliocène.
— 175 à — 190	: microfaune riche, remaniée. Age : Quaternaire ou Pliocène.
— 225 à — 245	: microfaune assez riche, remaniée. Age : Quaternaire ou Pliocène.
— 270 à — 335	: microfaune riche, remaniée. Age : Quaternaire ou Pliocène.
— 335 à — 375	: microfaune riche, remaniée. Age : Quaternaire ou Pliocène.
— 405 à — 425	: microfaune assez riche, remaniée. Age : Quaternaire ou Pliocène.
— 450 à — 495	: microfaune assez pauvre, remaniée ; 1 <i>Chara</i> . Age : Quaternaire (??) ou Pliocène.
— 510 à — 593,50	: microfaune assez pauvre, remaniée ; et quelques Ostracodes. Age : Quaternaire (??) ou plutôt Pliocène.

Comme changement de microfaunes, il signale en plus que les sept premiers échantillons de cette série ont donné une microfaune remaniée assez riche du Sénonien supérieur. Les deux derniers

sont moins riches, mais ils ont donné surtout des formes aturiennes remaniées. Il s'agit toujours de Crétacé remanié. On voit que s'il a tenté de définir l'âge, le seul critère sur lequel il semble s'être basé est la profondeur.

Il est donc vraisemblable que les sondages n'ont pas dépassé le complexe fluviatile correspondant à la période manoubienne, et apporté par la Medjerda quand elle descendait la vallée de Tunis. La puissance de ce complexe dépasserait 600 m au centre du synclinal. Toutefois cela n'est pas assuré car les formations antérieures sont constituées, comme nous le verrons, par des dépôts fluviatiles semblables aux précédents, mais laissés par la Medjerda de l'époque pliocène qui se dirigeait vers un delta situé à l'emplacement de Porto Farina. Et il est probable que rien ne permettrait de distinguer en profondeur les alluvions pliocènes des alluvions quaternaires, car en surface cette distinction est impossible. En traitant la tectonique, je montrerai la discontinuité qui a cependant affecté la sédimentation fluviatile de la Manouba, quand le golfe pliocène où se jetait la Medjerda s'est asséché au Villafranchien. Remarquons maintenant qu'une épaisseur supérieure à 600 m ne représente pas un volume considérable devant le débit solide de la Medjerda, car il s'est sédimenté dans l'étroit fossé synclinal de la Manouba.

Cette accumulation enfoncée par subsidence constitue l'unité *manoubienne* précédant l'unité *utiquienne*. Nous avons décrit auparavant l'aspect lenticulaire des passées sableuses. Les faciès, qui deviennent plus argileux en direction de la sebkra, sont également caractéristiques. Si les écoulements fluviatiles de l'amont s'effectuaient facilement par la brèche de Tunis avec, comme aujourd'hui, des dépôts sableux le long des berges, la région aval a dû toujours servir de bassin de décantation en régime plus ou moins endoréique. Dans cette zone, alors enfermée en amont de la Barrière de Tunis, des épandages de crues venaient abandonner leurs phases fines en suspension, à la suite de rupture des berges. Cet ombilic résulte d'une subsidence plus intense de l'W de la Barrière de Tunis. Les principales passées argileuses de la fig. 19 peuvent être interprétées comme d'anciennes sebkra dessalées aujourd'hui puisque les remaniements authigènes ont continué postérieurement au dépôt. Nous reviendrons aux granulométries de l'unité manoubienne à propos du lac de Tunis et de l'étude granulométrique.

Grâce à ces sebkra empilées sur la même verticale, le faciès endoréique prend un aspect vaguement cyclothématique. Les sebkra couronnant les cyclothèmes avancent d'une façon transgressive vers la Barrière de Tunis, en dépassant les cyclothèmes antérieurs enfouis par subsidence, à mesure que la flexure s'accroît.

D'ailleurs, dans cette sédimentation encore non consolidée les argiles et les sables imparfaitement triés au moment de leur dépôt peuvent se différencier davantage par la suite. En laboratoire, N. J. Denissov [1948] a montré comment les phases sableuses peuvent pénétrer à l'intérieur ou s'évader des masses argileuses molles, par des processus chimiques ou colloïdaux. La circulation des eaux souterraines favorise ces mouvements. Un sondage en Tunisie orientale, au SE de Sfax dans la propriété de Chaal appartenant à la Compagnie des phosphates de Gafsa, m'a permis une expérience sur le terrain. J'avais demandé un carottage latéral dans une récurrence marine sableuse très mince (2 m d'épaisseur) interrompant des limons continentaux à 250 m de profondeur, c'est-à-dire sous des pressions déjà élevées. La granulométrie que j'en ai faite au laboratoire de A. Rivière, au tamis et à la pipette d'Andreasen, a montré un classement marin assez net pour les phases précolloïdales, mais il est interrompu au niveau des phases colloïdales par surabondance de particules fines entraînées sans doute avec des déplacements d'eau (fig. 29 F). Une telle expérience n'était pas possible à la Manouba, d'abord en l'absence de faciès marins, ensuite à cause de la rareté des carottes.

CHAPITRE III

LA LAGUNE DE TUNIS

I. Un exemple de milieu lagunaire.

Géographie, histoire et biologie du lac de Tunis.

Si la Manouba-Sedjoumi est affectée de remaniements authigènes actuels, en ce qui concerne les transports allogènes c'est une structure morte. Il suffit de franchir la Barrière de Tunis pour découvrir un monde lagunaire toujours vivant, avec ses slikkes et ses schorres formant à la périphérie de plans d'eau sans profondeur une frontière tellement indécise que les contours des cartes changent à chaque édition. Le lac de Tunis est en effet privé de l'alluvionnement de la Medjerda détournée vers l'Utique, mais son littoral subit une érosion active, dont les produits contribuent à la sédimentation lagunaire. Après avoir décrit le milieu, nous traiterons de la phase authigène et ensuite de la granulométrie de la phase allogène, compte tenu de l'influence du domaine continental encadrant la lagune, et terminerons par l'étude de l'embouchure fossile de la Medjerda, qui prolongeait et complétait l'unité manoubienne à l'endroit où se trouve aujourd'hui le lac de Tunis.

Ramassée sur l'emplacement d'un ancien site de corsaires tapi entre les collines, Tunis se voit cernée par les eaux continentales et marines, et ne communique guère avec la terre que par d'étroites chaussées s'étirant à travers les marais. Les constructions étagées, successivement accumulées, ont transformé le paysage, tandis que quelque chose d'analogue au site primitif peut être retrouvé sur les pentes du Djebel Naheli au N de l'Ariana. Les versants sont doucement vallonnés et couverts d'oliveraies. Au pied des dernières pentes commence le domaine palustre.

Les collines mamelonnées du Pliocène ont une inclinaison faible et régulière qui favorise les écoulements. Les eaux dévalant des hauteurs occidentales de l'Ariana, du Belvédère et de la Casbah, arrachent et érodent, et les ravinements burinent les versants. A chaque forte pluie, la place Pasteur, sous le Belvédère, est recouverte d'un apport torrentiel de graviers et de galets. Une fois atteintes les basses terres sans pente de Tunis, les eaux ne trouvent plus d'écoulement et inondent la ville, généralement plusieurs fois par an, déposant les débris arrachés aux collines. Pour protéger la ville, les services des Travaux publics ont creusé un canal profond de 3 ou 4 m, qui doit dériver vers la lagune les eaux torrentielles descendues du Belvédère.

Le résultat est un lent abaissement des collines au profit des basses terres qui se surélèvent, d'où l'aspect ondulé dans le détail des vallonnements. Entre le Belvédère et l'Ariana ces collines sont plantées d'une ancienne oliveraie peut-être romaine. Les villas ont disparu mais les allées qui les desservaient persistent, bordées de deux rangées rapprochées d'Oliviers et de Caroubiers. Quand elles sont parallèles aux lignes de niveau, la rangée amont est généralement surélevée par rapport à la rangée aval et l'allée forme une vire déversée vers le vide, disposition curieuse qui ne semble pouvoir s'expliquer que par une lente solifluction.

La lagune ou lac de Tunis prolonge le golfe, dont elle se trouve séparée par un cordon littoral réunissant l'embouchure de l'Oued Miliane aux collines de Carthage, sa surface mesure environ 40 km². La profondeur de cette vaste nappe d'eau est très faible ; au N, entre Tunis et El Aouina, elle atteint rarement 50 cm et plus généralement varie entre 50 cm et 1 m ; les grandes profondeurs se localisent dans le lac Sud (au S de la Goulette) et sur le rivage de l'île Chekli, et elles ne dépassent pas 2 m.

L'île Chekli est un petit îlot de 800 m de circonférence. Il supporte un fort démantelé pour la construction duquel toutes les pierres ont été amenées. Elles parsèment maintenant l'îlot d'un échantillonnage assez complet des matériaux de construction tunisiens : Crétacé, Éocène, Oligocène, Miocène... Il y a également des blocs de croûte. Peut-être la plupart d'entre eux ont-ils été importés avec le reste, pour les parties légères du bâtiment. Par contre, des buttes de 1 à 2 m vers le N révèlent des traces de la croûte pulvérulente à la base des croûtes zonaires, qui, elle, n'a pas voyagé et se trouve en place. Il est parfaitement probable qu'elle était surmontée d'une zone rubanée comme ailleurs et que les blocs proviennent des terrassements précédant la construction, qui ont bouleversé un encroûtement préexistant. La surface de croûte, autour de laquelle se seraient déposées des alluvions, faisait vraisemblablement partie d'un ensemble maintenant enfoui.

Le lac, tel qu'on peut le voir aujourd'hui, n'a trouvé que récemment sa physionomie et ne peut être compris sans une esquisse de son évolution, qui permettra de faire la part des phénomènes naturels et celle des actions humaines.

Dans les temps historiques l'ancienne lagune de Tunis plus profonde s'ouvrait largement sur la mer, elle s'est progressivement fermée et colmatée. Il n'existe pas d'ouvrage à caractère régional traitant de l'évolution géographique du site. Cette déficience oblige à remonter aux sources¹. Des estampes des xvi^e, xvii^e et xviii^e siècles, conservées à la Bibliothèque municipale du Souk el Attarine, aident à comprendre les textes en illustrant les stades successifs.

La Carthage punique était construite sur une presqu'île reliée à la terre par l'isthme de l'Ariana séparant la mer d'Utique, au N, de la lagune de Tunis ouverte sur le golfe, au S. L'armée romaine assiégea la cité au ii^e siècle avant J.-C. et le consul Flaminius qui dirigeait l'assaut par le S était campé sur la plage le long des remparts, séparé de l'armée carthaginoise qui se trouvait sur l'autre rive du golfe [Gsell 1918]. Les basses terres, depuis la colline de Carthage jusqu'à La Goulette, étaient immergées.

Cependant une bande de terre dirigée vers l'W commence à s'individualiser : au ii^e siècle Polybe décrivait un isthme large d'un demi-stade et désignait la lagune sous le nom de « λιμνη » d'après le *de rebus punicis* d'Appien (p. 95). Le texte est cité par A. Audollent [1901] dans ses appendices.

Vers le v^e siècle il se forme à cet endroit une *ligula*, un cordon littoral encore fragmentaire. Une description de la basse époque retrouvée par le R. P. Delatre mentionne les tarifs du péage qu'il fallait acquitter pour traverser jusqu'à la côte sud au moyen de *rataria*, sortes de bac pour naviguer sur les rivières ou les lacs et représentés sur la mosaïque de l'Henrich Medeina [Heron de Villefosse, 1906]. Au xiii^e siècle le cordon littoral restait divisé en îles distinctes, laissant entre elles des solutions de continuité. Les soldats de Saint-Louis avaient débarqué sur l'une de ces îles et cherchaient un gué pour atteindre la côte et se ravitailler en eau douce, car ils y apercevaient de nombreux puits (de Nangis, *in* Audollent [1901]).

Entre le xiii^e et le xvi^e siècles, la langue de terre actuelle s'élabore et, au temps de Kherreddine Barberousse et de Charles-Quint, la fermeture était parfaite. Le chroniqueur Paul Jove [1574], que cite encore Audollent, véritablement géographe et géologue avant la lettre, est venu sur place. Il peint la courbure de ce cordon littoral sableux : *lunato flexu*, terme qui s'appliquerait à merveille au dessin actuel de celui de Porto Farina. Il explique comment Kherreddine, pour ouvrir une communication entre le lac et la mer, avait tenté de faire creuser un canal, et comment celui-ci s'obstruait, bouché par des sables venant du N et incessamment poussés par les flots. Ainsi le transport du N au S, tellement important pour l'évolution deltaïque de la Medjerda, a été découvert dès le xvi^e siècle par Paul Jove, qui fait figure de précurseur.

Charles-Quint fait établir sur les terres émergées une forteresse, dont un fragment démantelé se voit encore

1. J'ai été guidé par M. Saumagne, dans ces recherches, ainsi que pour la plaine d'Utique.

à La Goulette, et fait percer un canal au S de celui dont Paul Jove narre la déconfiture. En même temps qu'elle s'isolait du large, la lagune se colmatait et Charles-Quint a dû faire prolonger son canal jusqu'à Tunis. Le tracé en est encore reconnaissable sur les photos aériennes. Il faisait un coude qui l'amenait à côtoyer l'île Chekli dont les canons le prenaient en enfilade, si bien que la puissance maîtresse de l'îlot régénait le trafic. Cependant le tirant d'eau était encore suffisant pour permettre en certains endroits l'évolution des navires à voiles et des gravures au Musée du Bardo montrent la flotte de Charles-Quint en ordre de bataille devant Tunis.

Actuellement l'envasement s'est accéléré. Le vieux chenal est jalonné par des pieux que les marins de la Régies des pêches utilisent comme repères quand ils sont appelés à circuler dans les parages. Il reste le seul chemin permettant d'atteindre Chekli. Vers 1885, on a creusé à la drague le canal moderne qui divise le lac en deux parties : lac Nord et lac Sud. Les bordigues sont percées de quelques brèches qui mettent les deux zones en liaison restreinte avec la pleine mer. Avec les marées ou les vents, de violents courants s'établissent à leur voisinage, contribuant au renouvellement partiel des eaux.

A partir de l'ancienne Medina occupant les collines, la ville de Tunis s'est agrandie en empiétant sur le lac. Tous les quartiers neufs depuis la porte de France sont implantés sur de la terre rapportée. Cette évolution a certainement été incitée par une tendance naturelle à l'exondation et elle est conforme aux traditions locales, car on voit souvent les nomades du Sud s'installer pour l'été sur les sebkas momentanément desséchées et sans propriétaires, où ils sont d'ailleurs très mal. Les aménagements s'effectuèrent au hasard des besoins ou sur décrets administratifs. Ils n'ont fait l'objet d'aucune discussion, d'aucun compte rendu, si bien qu'on parvient à peine à les reconstituer. Cet état de chose se poursuit actuellement, de façon également incohérente, mais à l'aide de puissants moyens mécaniques. Depuis 1946 de grands travaux ont été entrepris au S du port, où on vient de gagner sur la mer de vastes territoires sur lesquels se construisent des dépôts et des ateliers. La carte au 50 000° ne correspond plus à la réalité. Une route établie sur une digue traverse des champs de vase nouvellement exondés et drainés.

La cité construite sans plan d'ensemble est hétérogène et mal commode. Elle est périodiquement inondée par les pluies, qui ne trouvent aucune voie de ruissellement ; il est également très difficile d'évacuer les eaux usées, qui doivent être pompées. M. Calvet [1951] relate comment le port de Tunis fut creusé en 1881 au fond de la lagune, au lieu d'être installé à Carthage, à la suite des démêlés du Consul de France Roustan avec les Compagnies anglaises « Tunisian Railway Company » puis italiennes « Rubbatino », successivement concessionnaires exclusives du chemin de fer Tunis-Goulette-Carthage.

Les eaux des égouts de la ville de Tunis sont pompées à l'usine élévatoire du Borgel et déversées dans le lac Nord, où elles introduisent un matériel organique considérable ainsi que des sels minéraux. Cet apport de mair d'homme modifie profondément le milieu et différencie le lac Nord du lac Sud qui en est préservé. La différenciation porte sur la salure des eaux, la faune, la flore et la sédimentation.

Le milieu lagunaire très particulier régent la sédimentation et doit être examiné. Le chapitre rejoint la biologie et la zoologie. Les sujets qui ne comportent pas d'observations personnelles sont traités rapidement ¹.

La salure des eaux. — En 1950, l'Administration a confié à la société « Hydrocure » l'étude d'un projet d'assainissement des eaux du lac. Celle-ci s'est accompagnée en particulier de nombreuses analyses chimiques dont j'ai pu prendre connaissance. Elles sont plus salées que les eaux de mer, le résidu sec est de 40 g en moyenne contre 35 g environ pour le golfe. Le lac Nord est moins concentré que le lac Sud, par suite de l'apport d'eaux douces des égouts. La concentration augmente en été. Dans le lac Sud en juillet elle approche des 50 g.

La teneur en chlore est inférieure à 20 g en janvier dans le lac Nord et, en juin, dans le lac Sud approche de 25 g. La teneur en carbonates est la teneur maximum compatible avec la concentration. Elle décroît quand la concentration augmente. Elle atteint 90 mg en janvier et passe à 50 mg en juin dans le lac Nord ; dans le lac Sud en juin, elle tombe à 35 mg.

1. Je dois la plupart des renseignements d'ordre zoologique, botanique ou biologique, pour ceux qui ne portent pas de références bibliographiques, à M. H. Heldt, directeur de la Station océanographique de Salammbô et à M^{me} H. Heldt, docteur ès-sciences, maître de Conférence à l'Institut des hautes études de Tunis.

La faune. — La faune malacologique est très pauvre. Pallary ne cite que :

Cardium edule L.

Lutricularis tenuis MONT. var. *trigona*

Paludestrina

Piranella

Syndesmia tenuis MONT.

Il faut ajouter vraisemblablement quelques *Rissoa*.

Je suppose que ces déterminations concernaient plutôt le lac Nord. La faune du lac Sud est plus riche et risque d'être un peu plus variée, mais elle n'a pas fait l'objet d'études et elle reste trop monotone pour en susciter une.

Les Poissons sont exceptionnels dans le lac Sud. Dans le lac Nord au contraire ils trouvent un milieu nutritif remarquable et prolifèrent. Le lac est surveillé et exploité par une Régie des pêches, le poisson est vendu au bénéfice de l'État. On y trouve :

— des Anguilles (*Anguilla anguilla*) abondantes,

— des Muges (cinq espèces : *Mugil cephalus*, *M. ramada*, *M. labrosus*, *M. auratus*, *M. saliens*) très abondantes,

— des Dorades (*Chrysophrys aurata*),

— des Loups (deux espèces : *Morone labrax*, *M. punctata*).

Le plancton est décevant, monotone et pauvre en genres. M^{me} J. H. Heldt y trouve des Copépodes, des Amphipodes et des Mysidacées.

Pour être complet, on peut signaler une Holothurie et de nombreux Vers, qui pullulaient dans le lac Sud près d'une ouverture des bordigues, là où l'eau est renouvelée, en communication avec le chenal. Je les ai ramenés en effectuant un prélèvement du fond.

On accordera une mention particulière à un Serpulien d'eau saumâtre : *Mercierella enigmatica* FAUVEL ; J. H. Heldt [1948] en donne une bonne description avec photos. Ces animaux n'existent pas dans le lac Sud. Dans le lac Nord leurs squelettes calcaires forment des sortes de récifs de 1 à 2 m de diamètre, qui se développent avec une telle densité qu'ils encombrement les eaux et compliquent la navigation. Les riverains les appellent vulgairement des « choux-fleurs » et sont parfois obligés de les défoncer à coup de gaffes pour frayer un passage à travers le lac à leurs « plates ». Cette formation zoogène contribue certainement au comblement progressif.

La flore. — Plus que celui de la faune, le développement de la flore dépend des apports nutritifs des égouts. Dans le lac Sud il y a peu d'Algues, seulement quelques Ulves dans des périmètres localisés, mentionnés avec la description des emplacements de prélèvement des vases. Dans le lac Nord au contraire les Ulves et les Enteromorphes prolifèrent. Entre la côte d'El Aouina et l'île Chekli elles envahissent complètement les eaux, en tissant un feutrage sans lacunes et elles affleurent la surface, à laquelle elles confèrent une teinte blanchâtre. Les Ulves disparaissent en juillet, époque de la sporulation, et leurs thalles reprennent leur développement en automne, à la germination des spores.

Le phytoplancton du lac Nord est d'une abondance extraordinaire. Des Algues unicellulaires diverses forment une purée qui affecte la turbidité des eaux. Il m'a été donné d'assister en 1950 et en 1951 à quelques-unes des expériences auxquelles procédait la société « Hydrocure ». Le disque de Cecci disparaît souvent entre 10 et 20 ou 30 cm.

Variations de la teneur en oxygène dissous. — La teneur en oxygène dissous est sujette à des variations importantes et fréquentes et constitue un cycle affecté par les saisons. Ce phénomène concerne exclusivement le lac Nord.

Les égouts y déversent annuellement un important tonnage de matières organiques ; également des phosphates et des nitrates qui favorisent le développement excessif des Algues chlorophylliennes et du phytoplancton chlorophyllien ou non. Les fermentations organiques ont pour effet d'abaisser la teneur en oxygène

dissous, l'assimilation chlorophyllienne au contraire l'enrichit. Le vent, qui agite et aère les eaux de surface, contribue à l'oxydation, la chaleur favorise les réactions réductrices, si bien que le lac Nord traverse successivement des phases plus ou moins anaérobies.

Quand l'anaérobiose est suffisamment prononcée à une certaine distance de la surface il se développe des bactéries sulfhydriques, dont le métabolisme a pour effet de produire un dégagement d'hydrogène sulfuré. H. Heldt avait mis au point en 1932 un appareil pour mesurer le dégagement d'H₂S, et a consigné ses observations dans un rapport établi en collaboration avec Faivre, adressé à la municipalité, sur les odeurs du lac de Tunis.

Les phases les moins oxygénées se signalent donc par une production d'hydrogène sulfuré caractéristique. Cet hydrogène sulfuré est lui-même un réducteur et il joue son rôle dans le cycle, en contribuant à son tour à diminuer la teneur en oxygène.

Les sulfuraires sont assez fréquents en Tunisie. Dans les conduites et les puits artésiens, il peut s'établir des conditions d'anaérobiose, qui permettent leur développement. E. Berkaloff et P. Menard [1940] indiquent, dans les puits artésiens de la région de Bizerte, la présence de *Vibrio rubentschiki* [Baars, 1931]. J'ai vu en 1949 la crépine d'un sondage à Gueniche, également dans la région de Bizerte, attaquée par l'acide sulfhydrique. En 1946 j'ai demandé au docteur L. Balozet, alors directeur de l'Institut Pasteur de Tunis, de bien vouloir faire une préparation bactérienne sur un prélèvement d'une source sulfureuse de la région de Kairouan. Les sulfuraires, vraisemblablement *Vibrio desulfuricans*, y étaient très reconnaissables.

Le caractère anaérobie du milieu peut s'aggraver en été. En effet, la chaleur augmente, le vent cesse et les Ulves après la sporulation disparaissent. D'autre part, les eaux sont soumises à une évaporation intense, leur concentration augmente et la teneur maximum en oxygène dissous diminue à la fois avec la salure et la température. Par exemple, pour une teneur en chlorures de 20 %, à 0° elle est de 8 cm³/l, et à 30° de 4,5 cm³/l. L'effet de la faible teneur en oxygène est encore aggravé par le caractère toxique des émanations d'H₂S. Les poissons peuvent périr asphyxiés en masse. Ils commencent par refluer vers la brèche dans la bordigue à La Goulette, où peut parvenir l'eau du large et si celle-ci n'entre pas (absence de vent ou de courants), ils meurent.

Le phénomène ne se produit pas tous les ans. Il a eu lieu avec une particulière gravité les 28 et 29 juillet 1950. Les renseignements suivants sont tirés d'un rapport de H. Heldt conservé dans les Archives de la Direction des travaux publics : les eaux du lac atteignaient 30° et leur chloruration 24,5 %. A 8 h, près des chenaux de la bordigue, la concentration en oxygène dissous était de 0,43 %. A 10 h, dans le lac, elle était revenue à 1,20 %.

H. Heldt évalue à une centaine de tonnes la masse de matériel résultant de cette mortalité « cataclysmique ». A une pareille échelle on peut invoquer des phénomènes analogues pour expliquer des formations géologiques à caractère accidentel. H. Heldt, A. Rivière et P. Bellair [1947] y ont trouvé une origine possible des « bone-beds » des séries à faciès lagunaire. On peut voir également dans ces phases d'asphyxie périodique la cause de la raréfaction de la faune malacologique dans le lac Nord. Ces animaux moins mobiles que les Poissons sont plus vulnérables, car ils ne peuvent émigrer en masse vers La Goulette où l'eau est renouvelée et, d'autre part, ils ne parviennent pas à repeupler entre deux destructions. M^{me} Heldt m'a signalé avoir trouvé un groupe de très jeunes sujets de *Cardium*, morts sur le rivage de la lagune après une période de désoxygénation.

Le cycle est sous la dépendance de l'apport artificiel des égouts de la ville, dont la contribution en matière organiques et en sels minéraux permet seule les fermentations et la prolifération de la flore. Le lac Sud, qui en est préservé, ne présente rien de semblable. Il sera instructif de rapprocher ces observations de celles qui ont pu être faites ailleurs dans un milieu non perturbé par les déchets humains.

A Walwis Bay sur la côte du Sud-Ouest africain, entre le 20° et le 24° parallèle Sud, une mortalité catastrophique semblable se reproduit périodiquement au cours de l'été austral, avec un maximum de fréquence en

décembre. M^{me} Brongersma-Sanders [1944, 1945, 1947, 1948] y décrit une zone azoïque et une abondante production d'hydrogène sulfuré. Les accumulations des squelettes de Poissons et de très nombreux squelettes siliceux de Diatomées forment jusqu'à 60 % des sédiments qui se déposent. D'après J. M. Marchand [1928] la cause de la mortalité serait la teneur en H₂S, et comme à Tunis elle est favorisée par la chaleur et l'absence de vent [Classen, 1930].

Il manque à Walvis Bay l'apport des sels minéraux déversés avec les égouts, mais un phénomène naturel le remplace et provoque un enrichissement analogue. Des eaux en mouvement ascendant, ou « upwelling water », ramènent à la surface sous forme soluble les phosphates et les nitrates, contenus à l'état insoluble dans les cadavres du zooplancton tombant vers le fond. Elles contribuent à la prolifération du phytoplancton et particulièrement des Dinoflagellés. Les « upwelling water » sont assez générales et observées dans toutes les mers [Brongersma-Sanders, 1948].

La similitude s'arrête là, parce qu'à Walvis Bay le cycle du soufre se complète. Lorsque les sulfuraires ont produit une quantité suffisante d'H₂S, on voit se développer des Dinoflagellés aérobies avec un grain de soufre dans leur protoplasme, ou sulfobactéries, qui oxydent l'H₂S et oxygènent le milieu [Brongersma-Sanders, 1944, 1945, 1947, 1948]. Les Dinoflagellés possèdent un pigment rouge. Leur accumulation finit par colorer la mer. C'est le phénomène des *eaux rouges* qui se reproduit périodiquement à Walvis Bay, et dont le spectacle, bien fait pour impressionner, a été signalé un certain nombre de fois dans diverses parties du monde [J. H. Heldt, 1952]. Ce n'est plus comme à Tunis par asphyxie que meurent les Poissons. Ils succombent sous l'effet d'une toxine produite par certains Péridiniens : *Gymnodinium*, *Provocentrum*, ou surtout *Goniaulax*. Pour M^{me} H. Brongersma-Sanders le genre *Goniaulax* est particulièrement nocif. Kofoid [1911], dans un travail détaillé sur les Dinoflagellés, signale plusieurs exemples de mortalités massives causées par la prolifération d'un *Goniaulax*, dont il décrit l'espèce. Une photo d'un amoncellement de cadavres est suggestive. Les Poissons périssent empoisonnés dans un milieu contenant de l'oxygène. Leur ingestion est dangereuse et peut même entraîner des accidents mortels, alors que ceux du lac de Tunis ont été consommés par les riverains sans inconvénients.

Cependant à Tunis, dans une lagune à peine séparée du lac, sur la route du Kram, M^{me} Heldt [1952] a trouvé des eaux rouges qui contenaient des Péridiniens visibles au microscope. La coloration prononcée rouge sang de bœuf ne pouvait se confondre avec une teinte rosée, observable dans une autre lagune et due à *Dunaliella salina*. Si les perturbations apportées dans l'écologie du lac de Tunis par les actions humaines modifient assez profondément les phénomènes naturels, le cycle observé n'est pas différent de celui que l'on peut trouver ailleurs en des conditions purement naturelles.

M^{me} M. Brongersma-Sanders [1948] voit dans ces accumulations de cadavres une explication possible à la genèse des pétroles. Elle pense que du plancton ne donnerait jamais assez de matière et rappelle la présence des Poissons fossiles dans les schistes bitumineux. Mais indépendamment de l'origine de la matière organique, il faut que la fermentation bactérienne qui aboutira aux hydrocarbures puisse avoir lieu en anaérobiose. Le lac de Tunis apporte l'exemple d'un milieu naturellement anaérobie, où l'anaérobiose résulte précisément de l'afflux des matières organiques. On pourrait penser que l'anaérobiose n'est effective qu'aux périodes de mortalité des Poissons, mais en réalité la quantité d'oxygène dissous dans les eaux varie suivant la profondeur et elle est toujours pratiquement nulle vers le fond. L'odeur nauséabonde de l'hydrogène sulfuré, qui implique la présence d'un milieu anaérobie, se fait sentir très fréquemment et jusque dans l'agglomération tunisoise. En 1932, H. Heldt a observé un dégagement à peu près continu d'H₂S devant l'avenue Gambetta. Dans le lac Sud, près des ouvertures du canal par lesquelles pénètre l'eau aérée du large, la vase que j'ai prélevée grouillait d'une faune limicole, alors qu'ailleurs, et surtout dans le lac Nord où les facteurs nutritifs deviennent encore meilleurs, elle est azoïque. Cette différence ne peut évidemment résulter que de la déficience en oxygène et des émanations toxiques d'H₂S.

Le lac de Tunis, où la vase dépourvue d'oxygène est elle-même recouverte d'une eau anaérobie, aurait pu être un exemple à citer d'un milieu favorable à la genèse des hydrocarbures.

Mais en réalité les sondages qui traversent la vase trouvent en profondeur des infiltrations d'eaux souterraines riches en oxygène dissous, qui restreignent l'épaisseur de la couche en anaérobiose.

J'ai procédé à deux prélèvements en 1953, dans le lac Nord et le lac Sud. Au S. E. R. E. P. T., J. Suess a bien voulu chercher un dégagement éventuel d'hydrocarbures au moyen d'un détecteur à pont de Wheatstone mis au point par E. Vellinger et R. Monicard [1950]. Le principe consiste à oxyder les hydrocarbures sur un filament de platine monté sur le pont. L'oxydation dégage de la chaleur qui élève la température du filament et par suite la résistance. Le méthane et les homologues supérieurs se distinguent par leur température d'oxydation. Il n'a même pas trouvé de méthane, mais les gaz ont pu se perdre au moment du prélèvement, car je n'ai disposé que d'une benne et il aurait fallu une sonde.

A un point de vue pétrographique plus concret, ce milieu biologiquement anaérobie reste surtout remarquable par les fermentations sulfureuses. Pour le reste il faut plutôt se limiter à l'aspect chimique et retenir qu'il est réducteur, en même temps qu'alcalin. Nous poursuivrons par une étude physicochimique des vases.

II. Sédimentation authigène organique et minérale dans la lagune de Tunis.

Description systématique de la faune sédimentée. — Techniques d'étude de la sédimentation minérale. — Sédimentation calcaire. — Dépôt des matières organiques. — Magnésie et sédimentation dolomitique. — Sédimentation phosphatée. — Sédimentation du fer.

Le lac de Tunis intéresse le géologue dans la mesure où il sédimente. Nous commencerons par une étude des éléments liés à l'activité des organismes (sédimentation zoogène). Du point de vue chimique il y a lieu de distinguer deux phases dans le sédiment :

a) *Des combinés nouveaux prenant naissance dans le milieu si particulier qui les baigne : c'est la phase authigène.*

b) *Des éléments d'origine allochtone dont la présence est liée aux apports alluviaux (quartz, minéraux argileux, hydrates de fer et d'alumine) qui constituent la phase allogène.*

DESCRIPTION SYSTÉMATIQUE DE LA FAUNE SÉDIMENTÉE. — Elle est essentiellement constituée par des tests d'organismes calcaires.

La faune actuelle est pauvre, mais quand la lagune était ouverte il n'en allait pas de même et d'abondants dépôts coquilliers s'accumulaient au fond. En 1885, à l'époque des dragages du chenal, ces débris ont été extraits en masse et déposés sur les berges des bordigues ; ils ont fait l'objet d'une étude demeurée classique de P. Pallary [1912].

Les déterminations de Pallary offraient par certains côtés des comparaisons intéressantes avec les faunes que j'ai récoltées dans le Pliocène, à l'Oued Gelaa et à l'Oued Morra. Ceci m'a incité à en donner ici la nomenclature détaillée. La fréquence n'est mentionnée qu'irrégulièrement par l'auteur.

GASTROPODES :

Retusa dilatata PALLARY

Bulla striata PALLARY

Haminea hydatis L.

Philine aperta L. (1 ex.)

Conus mediteraneus BRUG. (ab.)

Ginnania fuscata DESH. (assez ab.)

Cordieria cordieri PAYR. (1 ex.)

Philibertia bicolor RISSO (3 ex.)

Philibertia pruinosa PALLARY

Mangilia (3 espèces)

Gibberula (4 espèces)

Uromitra (4 espèces)

Polia bicolor CONTRAINE

Euthria cornea.

Nassa turgida B. D. D.

Amycla corniculum OLIVI

Cyclonassa neritea L.

Typhis sowerbyi BRODERIP (3 ex.)

Murex (2 espèces, ab.)
Ocenebrina (3 espèces)
Cerithium (3 espèces, dont *C. vulgatum* BRUG., très ab.)
Pirenella conica BLAINV.
Vermetus gigas BIVONA
Vermetus gaederopi MÖRCH.
Rissoa (5 espèces, ab.)
Crepidula crepidula L.

Natica (4 espèces dont *N. hebraea* MARTYN, petite taille)
Acteopyramis bulinea LOWE (1 ex.)
Turbonilla lactea (assez rare)
Phasianella speciosa VON MÜHLFELD var. *minor* (très ab.)
Trochocochlea turbiformis VON SALIS (forme d'eau saumâtre, ombilic apparent)
Gibbula (3 espèces).

SCAPHOPODES : *Dentalium dentale* L. (très ab.)

PÉLÉCYPODES :

Ostrea lamellosa BROCCHI (ex. de grande taille à test épais)
Spondylus gaederopus L. (très ab.)
Chlamys (2 espèces, rare)
Nucula nucleus L. (assez ab.)
Venericardia antiquata L. (petite taille)
Cardium exiguum GMELIN (ab.)
Cardium edule L. (très ab.)

Cardium paucicostatum Sow. (ab.)
Dosinia lupinus POLI (rare)
Tapes (3 espèces, rare)
Corbula gibba OLIVI var. *tunetana* PAL.
Barnea candida L. (rare)
Loripes lacteus L. (ab.)
Tellina (2 espèces seulement, rare)
Syndesmya (3 espèces, très ab.)

D'après Pallary cette faune montre que la lagune, beaucoup plus profonde que le lac actuel, était en communication étendue avec le golfe, dont proviennent un certain nombre d'espèces ; en particulier les *Gibberula* et *Barnea candida*. L'abondance des formes allongées, surtout dans le genre *Rissoa*, semble indiquer un fond d'herbier analogue à celui du golfe de Gabès. Seuls, *Cardium edule* et *Syndesmya tenuis* ont pu persister dans la lagune [Pallary, 1912 et 1914].

Dans cette liste nous noterons la présence de *Vermetus gaederopi*, qui vit en association avec les Éponges, et indique également un fond analogue à celui trouvé entre Sfax et Djerba.

Même la faune raréfiée d'aujourd'hui finit par donner lieu à des accumulations importantes. Les berges du lac Sud, quand elles ne sont pas envasées, forment une plage intégralement constituée de fragments plus ou moins discernables de coquilles. Il en est de même de l'île Chekli, du côté opposé au flux des égouts. Plusieurs de mes prélèvements du fond du lac étaient riches en débris de coquilles. Pour le lac Nord, rappelons l'importance relative des *Mercierella enigmatica* dans les sédiments déposés. Les échantillons étaient littéralement truffés de leurs débris. Les squelettes animaux fournissent un apport de calcaire (sous forme d'aragonite principalement) dont nous mentionnerons le rôle dans la construction de la roche en traitant la sédimentation minérale.

TECHNIQUES D'ÉTUDE DE LA SÉDIMENTATION MINÉRALE. — Le fond du lac est constitué par un sédiment gris ou noirâtre, impalpable, d'odeur souvent prononcée, rappelant les vases estuariennes ou littorales. Les zones exondées sont formées d'un matériau analogue dont la teinte s'éclaircit notablement lors de la dessiccation. Des fissures de retrait les découpent en y dessinant un réseau polygonal.

Toute étude postulait au préalable la récolte d'échantillons des fonds sous-marins en des points aussi variés que possible. La navigation sur le lac est difficile du fait de l'insuffisance des profondeurs et des récifs de *Mercierella enigmatica*. Elle est d'autre part soumise à autorisation.

Le 28 mars 1951 j'ai pu utiliser par l'entremise de M. Heldt une plate à moteur appartenant à la Régie des pêches. C'est une embarcation spécialement adaptée, d'environ 10 cm de tirant d'eau, propulsée par une hélice tournant à l'intérieur d'un tunnel protecteur ; elle est destinée à la surveillance des pêcheries. Les méthodes de prélèvement étaient rudimentaires, nous nous

sommes contentés d'utiliser un aviron comme pelle. C'était alors l'époque de l'exécution de l'étude confiée à la société « Hydrocure ». Le 2 et le 6 avril 1951, j'ai profité de leurs itinéraires. Le bateau était toujours celui de la Régie des pêches, mais la méthode de prélèvement était meilleure. Grâce à l'obligeance de M. Tixeront, ingénieur en chef à la Direction des travaux publics, M. Cœur-Bizot, ingénieur de la société « Neyrpic », qui était chargé en Tunisie d'études concernant les barrages en construction, a été autorisé à m'accompagner. Il disposait d'une drague Rollerville, cet instrument découpe le fond et permet de prélever une tranche de 20 cm d'épaisseur.

J'ai pris également des sédiments exondés près du port, en profitant des nouvelles voies d'accès.

EMPLACEMENT DES PRÉLÈVEMENTS ET OBSERVATIONS « IN SITU ». — La carte de la fig. 27 précise les emplacements des prises. Chaque station est désignée par un numéro d'ordre de 1 à 18, qui définira également les échantillons. Cette carte a été établie d'après un plan à grande

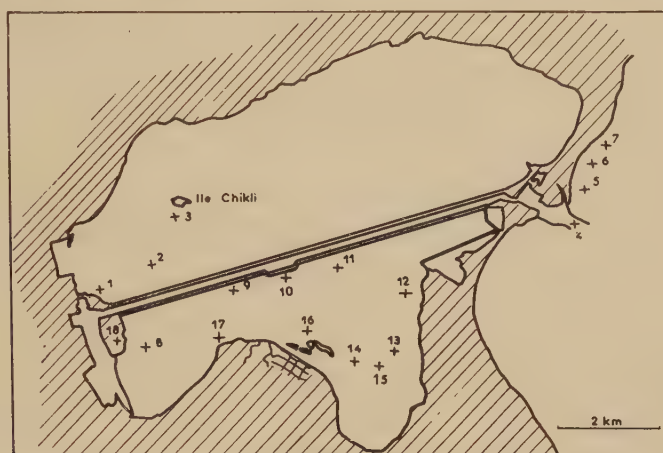


FIG. 27. — Situation des prélèvements de vase dans la lagune de Tunis.

échelle (1/5 000^e) dessiné pour « Hydrocure » où les stations sont repérées avec précision grâce à des déterminations topographiques.

Je commencerai l'exposé par l'énoncé des observations effectuées lors des prélèvements.

Lac Nord. Le lac Nord est obstrué en grande partie par les déjections nauséabondes provenant de l'usine élévatoire du Borgel. Aussi n'y ai-je effectué que trois prélèvements :

	Profondeur
1 — après avoir écarté les <i>Mercierella</i> , on a récolté une substance brune, compacte.....	1 m
2 — même processus.....	1
3 — fond dur, préservé des égouts par l'île Chekli.....	2

Partout : eau trouble, fond invisible.

Lac Sud. Onze prélèvements de 8 à 18, permettent une description méthodique :

8 — eau trouble, fond invisible.....	0,60 m
9 — <i>id.</i>	0,60
10 — eau limpide, fond recouvert d'Algues.....	0,30
11 — à proximité de la nouvelle brèche dans la bordigue, eau trouble, courant accéléré. C'est le prélèvement ayant découvert la faune limicole dont il a été question.....	1,30
12 — eau limpide, fond jaunâtre recouvert de fragments de coquilles.....	0,80
13 — eau trouble, fond durci où la drague n'enfonce pas.....	0,65
14 — eau trouble, fond très dur, le contenu de la drague paraît sableux.....	0,70
15 — eau trouble.....	0,60

16 — eau trouble, fond assez dur.....	0,70
17 — eau trouble	0,70
18 — sédiment exondé près du port.	

Fond du golfe. Quatre stations ont été effectuées dans le canal et au large de La Goulette à l'aide d'une vedette à moteur. Leur but était de différencier les caractéristiques sédimentaires du lac et du golfe : 4 (centre du canal) à une profondeur de 14 m ; 5 à 2 m ; 6 à 3 m et 7 à 8,80 m.

EXAMEN MACROSCOPIQUE. — A l'œil nu tous les échantillons se ressemblent et se présentent comme une pâte sombre, bien liée, plastique, encombrée de débris de coquilles qu'elle agglutine. La teinte est plus ou moins noire, l'odeur plus ou moins accentuée, la masse plus ou moins fluide, mais aucune classification n'est possible.

Après deux ou trois semaines en bocal, certains échantillons sont l'objet de fermentation et dégagent une odeur d'œuf pourri très caractéristique de l'hydrogène sulfuré.

EXAMEN MICROSCOPIQUE. — Sous le microscope, la vase fraîche, contenant encore toute son eau, se disperse en petits amas floconneux. Après deux ou trois semaines de dessiccation, elle prend l'apparence de grains, visibles à 400 diamètres, restant agglutinés en masses grumeleuses. Si on l'humidifie, les grains se dissocient et se disposent par capillarité autour des gouttelettes d'eau, mais il n'y a plus trace des flocons de l'échantillon frais.

En lumière polarisée on découvre des quartz en grains généralement petits, arrondis, usés, corrodés. Et peut être quelquefois les teintes de la calcite, mais les cristaux sont à peine formés.

MÉTHODES PHYSICO-CHIMIQUES. — Y. Jouin, chef du laboratoire du Service des mines à Tunis a bien voulu procéder à des analyses totales par calcination, pour lesquelles il était outillé, suivant les routines convenant aux matériaux de construction et aux minéraux, ainsi qu'à des granulométries au densimètre. Ces opérations préliminaires ont déjà donné une représentation sous tous ses aspects du matériel à étudier. C'est au laboratoire de A. Rivière que j'ai trouvé les techniques d'études sédimentaires modernes. Mes recherches dirigées et contrôlées par A. Rivière ont porté sur le fer et sur la granulométrie. Les résultats d'Y. Jouin ont suffi à un examen de la sédimentation calcaire et dolomitique.

ANALYSES CHIMIQUES. — Les tabl. 9 et 10 donnent les analyses des sels solubles et de l'insoluble par calcination des différents prélèvements.

N° D'ORDRE DES ÉCHAN- TILLONS	INSO- LUBLE	EXTRAIT SOLUBLE	Ca	Mg	Na	SO ₄	Cl	CO ₃	K
1	90,33	5,24	0,57	0,05	1,33	0,95	1,88	0,42	néant
2	88,24	4,66	0,45	0,05	1,24	0,97	1,67	0,28	—
3	93,83	3,75	0,46	0,03	1,01	0,68	1,35	0,34	—
4	91,81	4,85	0,36	0,03	1,61	0,45	2,31	0,30	—
5	97,28	1,84	0,23	traces	0,51	0,26	0,85	0,28	—
6	97,32	1,74	0,22	0,06	0,46	0,21	0,67	0,31	—
7	93,39	2,01	0,24	0,03	0,46	0,22	0,67	0,34	—
8	89,96	3,33	0,26	0,09	0,83	0,70	0,85	0,33	traces
9	91,93	4,92	0,44	0,16	0,09	1,05	1,42	0,79	—
10	87,91	6,69	0,36	0,17	1,75	0,57	2,52	0,49	néant
11	94,26	2,32	0,27	0,06	0,55	0,59	0,60	0,33	—
12	91,08	3,60	0,27	0,06	0,97	0,74	1,28	0,31	—
13	96,38	1,48	0,27	0,03	0,27	0,46	0,32	0,31	—
14	96,59	1,42	0,29	0,02	0,30	0,53	0,21	0,25	—
15	91,27	4,30	0,18	0,08	1,10	0,86	1,45	0,25	—
16	93,32	2,64	0,24	0,07	0,64	0,80	0,60	0,25	—
17	97,57	1,04	0,29	0,05	0,18	0,44	0,07	0,28	—
18	84,31	10,25	0,48	0,13	3,22	1,40	4,79	0,39	traces

TABL. 9. — Sels solubles par épuisement à l'eau.

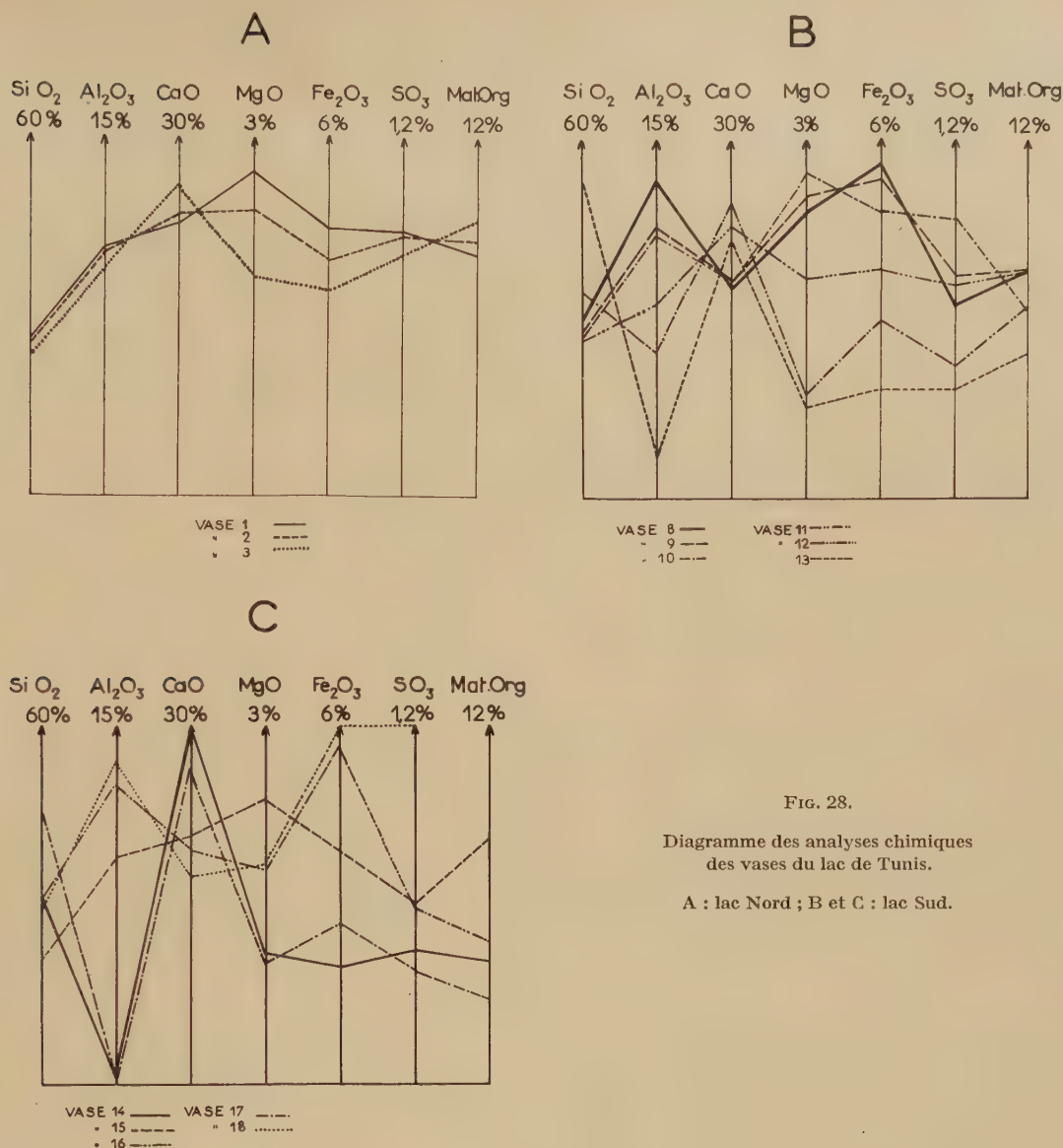


FIG. 28.

Diagramme des analyses chimiques
des vases du lac de Tunis.

A : lac Nord ; B et C : lac Sud.

N° D'ORDRE DES ÉCHANTILLONS	PERTE AU FEU	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	TOTAUX
1	30,52	26,40	10,12	4,48	23,11	2,71	0,88	98,22
2	32,67	25,90	9,96	3,84	23,69	2,44	0,87	97,37
3	32,80	23,40	9,62	3,44	26,67	1,88	0,81	96,62
4	26,34	31,40	13,85	5,45	18,85	1,80	0,40	98,59
5	18,85	53,25	4,10	2,88	20,18	0,99	0,23	100,48
6	17,76	56,84	1,10	4,72	20,18	0,82	0,20	101,62
7	25,15	37,58	4,64	4,88	27,56	1,20	0,25	101,26
8	28,82	30,23	13,22	5,60	17,33	2,38	0,66	98,24
9	30,68	28,41	11,53	5,37	18,49	2,57	0,75	97,80
10	32,42	28,37	11,00	4,80	17,60	2,79	0,94	97,92
11	27,54	34,82	5,74	2,96	25,90	0,87	0,45	98,28
12	29,22	27,84	7,58	3,84	23,66	1,86	0,72	94,72
13	18,33	53,09	1,22	1,84	21,84	0,79	0,37	97,48
14	28,24	31,82	0,68	2,00	33,60	1,08	0,45	97,87
15	30,04	26,88	9,56	3,92	20,72	2,42	0,61	94,15
16	20,69	30,96	12,03	5,69	19,60	1,78	0,59	91,34
17	21,76	46,53	néant	2,64	26,88	0,98	0,38	98,93
18	26,84	28,96	13,44	6,16	17,78	1,84	1,21	96,23

TABL. 10. — Insoluble par calcination.

Les premières opérations ont été effectuées sur le matériel sec. Les sels solubles ont d'abord été extraits à l'eau distillée bouillante, on a dosé le résidu sec et les électrolytes suivant les procédés utilisés habituellement pour les eaux (tabl. 9).

Ensuite l'insoluble a été traité par fusion à 900° ; en mélangeant à la masse CO_3K_2 et CO_3Na_2 . Le fer et l'alumine sont précipités par l'ammoniac. L'insoluble SiO_2 est traité par l'acide fluorhydrique (tabl. 10).

Les diagrammes de la fig. 28 (A, B, C) sont établis d'après les résultats de ces tableaux.

Fer, calcium, magnésium, soufre, constituent la phase authigène et seront examinés successivement. Restent les matières organiques figurant dans la perte au feu, qui ont posé un problème.

SÉDIMENTATION CALCAIRE. — Le caractère le plus immédiat des eaux est leur plus grande salure, dépassant celle de l'eau de mer. Elle peut entraîner la précipitation des composés les moins solubles, c'est-à-dire les carbonates.

Précisons la composition ionique en reproduisant une analyse demandée par M. Solignac, qui est celle d'un échantillon d'eau du lac Nord au large d'El Aouina.

Ca	1,220 mg/l	SO_4	2,982 mg/l
Mg	1,026 —	CO_3	96 —
Na	13,177 —	Résidu sec.	41,850 —
Cl	23,108 —	pH	8,1

Le pH basique diminue la solubilité du CO_3Ca . On a vu plus haut qu'en été cette vaste nappe liquide se concentrait et que la teneur en carbonates diminuait quand la concentration augmentait. C'est le signe d'une précipitation. Le carbonate de calcium, moins soluble, formera l'essentiel du précipité.

Ce phénomène est étudié au laboratoire *in vitro* par G. Lucas [1948 a]. Il augmente l'alcalinité en ajoutant à l'eau de mer une solution décimolaire de Na_2CO_3 . Il obtient un précipité qu'il étudie ; d'abord du CaCO_3 et, en enrichissant davantage la solution, du MgCO_3 plus soluble. Cela pourrait se produire en mer libre, mais l'enceinte close du lac de Tunis est particulièrement favorable.

La présence de calcaire dans les vases est classique. C'est le *bri* des marais bretons ou charentais, ce que J. Welsch [1919] appelait *les marais maritimes*. M. M. Iermolaïev [1948] observe l'enrichissement en calcium des vases de la mer Noire et le trouve en rapport avec le coefficient d'oxydoréduction.

Au cours des examens chimiques, le grillage détruit le CO_3Ca et fait apparaître le calcium sous forme de chaux. Les analyses établies en pourcentages ne permettent pas de calculer les teneurs pondérales. Elles apportent un classement comparatif des échantillons. Voici les résultats par ordre de teneur décroissante en pourcentages de CaO des différents prélèvements :

n° 14 = 33,60 %	n° 12 = 23,66 %	n° 16 = 19,60 %
7 = 27,56	1 = 23,11	4 = 18,85
17 = 26,88	13 = 21,84	9 = 18,49
3 = 26,67	15 = 20,72	18 = 17,78
11 = 25,90	5 = 20,18	10 = 17,60
2 = 23,69	6 = 20,18	8 = 17,33

Ces valeurs sont importantes. Elles permettent de rapprocher certaines parties de ces alluvions en voie de consolidation d'une véritable roche calcaire constituée au cours d'un cycle sédimentaire. Pour l'apprécier, comparons avec deux analyses chimiques effectuées par des procédés analogues et se rapportant à un calcaire massif compact, de teinte sombre, et à un calcaire délité,

fragile, se débitant en éclats acérés. Les deux appartiennent à l'Aptien. Le premier est celui sur lequel on construit le barrage-réservoir de l'Oued Mellègue, l'autre se trouve au mur.

	Calcaire massif	Calcaire délité
Humidité	0,59 %	0,92 %
Perte au feu	35,80	27,15
SiO ₂ libre.....	11,32	20,80
SiO ₂ combinée	4,87	11,35
Fe ₂ O ₃	1,60	2,40
Al ₂ O ₃	0,16	1,44
CaO.....	43,60	31,98
MgO.....	0,72	1,65
SO ₃	0,80	0,55

Nos produits les plus riches, le n° 14 en particulier, rivalisent avec la roche aptienne. Ce n° 14 se distinguait dès son prélèvement ; le fond était si dur qu'il fallut s'y reprendre à plusieurs fois avant de parvenir à en racler avec la drague Rollerville.

Cependant je ne crois pas que ces matériaux soient appelés à évoluer simplement en calcaire, si ce n'est quelques passages de faciès localisés. On en discutera par la suite quand on disposera de tous les éléments constitutifs, ainsi que des coupes de sondages qui renseignent sur les transformations en profondeur.

Lac Sud. Les échantillons se classent en : éch. 14 > 30 % ; éch. 17, 11 et 12 compris entre 30 et 23 % ; éch. 13, 15, 16, 9, 18, 10 et 8 < 22 %.

Les régions les plus calcaires se trouvent sur les bords du lac où l'eau est soumise à la plus forte évaporation.

Lac Nord. Les trois prélèvements sont riches. Un sondage, demandé à Kherreddine par M. Solignac au moment des travaux d'agrandissement de l'aéroport, a pénétré dans de la vase consolidée. L'analyse datant de 1931 est calculée en carbonates de chaux. Il y en aurait 75,18 %. D'après Y. Jouin, chef du laboratoire, ce résultat d'archives est sujet à caution.

Fond du golfe. Dans le canal et au large de La Goulette, sous les eaux de mer normalement salées du golfe, la teneur en calcium est faible malgré la plus grande abondance des coquilles.

La précipitation était visible d'une façon concrète quand j'ai circulé sur le lac Sud. Entre les stations 10 et 11 l'eau est devenue limpide, ce qui permettait de voir la vase du fond recouverte d'une sorte de cuticule vraisemblablement purement calcaire, une poussière impalpable blanche ou jaune, impossible à gratter sur la vase molle qui se dispersait en nuages opaques au moindre contact. On ne put savoir si elle contenait des squelettes de Foraminifères, mais il n'y en avait aucun de visible dans les échantillons récoltés au voisinage. Sa nature est suggérée par les analyses, puisque les points 11 et 12 sont parmi les plus riches en CaO. Quand l'eau est agitée par le vent, cette cuticule se met en suspension et affecte la turbidité, mais ce jour-là elle était retombée comme un voile sur tous les objets, en particulier les grands thalles foliacés des Algues.

La précipitation physique se lie aux apports zoogènes. Les prélèvements du lac Sud les plus chargés en débris de coquilles étaient les n°s 12, 13, 16. A la station 12, cette poussière recouvrait le tapis de coquillages comme un voile. Il pourrait s'agir là du processus d'élaboration d'une roche calcaire : coquilles ultérieurement fossilisées avec évolution de l'aragonite instable en calcite et enrobées dans une pâte d'origine physico-chimique.

Mais une partie des carbonates de chaux fixés par les organismes peut être redissoute et s'incorporer par recristallisation au ciment. Les *Mercierella enigmatica* sont particulièrement fragiles. C'était l'explication ancienne, quand on s'inquiétait moins des phénomènes physiques. Ici, dans le lac Sud, elle paraît valable à un certain point, car la région la plus calcaire, située sous des

eaux aérées par les vents du large, est la plus riche en coquilles, mais d'autre part, cette région éloignée des ruissellements peut être plus chargée en sels dissous.

La sédimentation calcaire du lac de Tunis s'oppose à celle des sebkra qui l'environne et qui est surtout formée de composés solubles (sulfates et chlorures), et ceci bien que les eaux du lac soient presque aussi concentrées que celles des sebkra. Cette différence tient à deux facteurs, dont chacun serait suffisant.

1) *La sebkra est une formation aval, où les eaux arrivent déjà épurées de leurs carbonates. Le lac au contraire est un milieu toujours renouvelé et la mer lui fournit une réserve inépuisable d'ions Ca^{++} .*

2) *La sebkra n'est recouverte que d'une faible pellicule d'eau, tandis que le fond du lac est immergé sous un liquide à niveau maintenu constant. Cette plus grande quantité d'eau empêche une concentration suffisante à la cristallisation des sulfates et surtout des chlorures.*

Dans les marais salants, en particulier, il n'y a qu'une faible pellicule d'eau, mais d'eau de mer carbonatée cette fois. Il ne s'y produit donc pas une précipitation fractionnée étagée des carbonates, les sulfates et les chlorures, comme dans un ombilic endoréique, et tous les anions sont mélangés. Cependant, comme les carbonates ne sont pas assez solubles pour que leur teneur puisse augmenter sensiblement au cours de l'évaporation, leur proportion reste faible.

Inversement, si un lac d'eau douce reçoit des apports de rivière suffisants pour compenser l'évaporation, sous une hauteur d'eau convenable il se déposera du calcaire, à condition que le pH rende ces eaux *incrustantes*. C'est le paysage du *lac calcaire* de G. Millot [1949]. Près de Tunis, dans la région étudiée, il n'y a pas de telles formations, mais des calcaires lacustres quaternaires sont fréquents en Tunisie. Il en existe un bel exemple à côté du barrage en construction de l'Oued Mellègue : une lentille de 25 à 30 m de puissance et de 15 ou 20 ha de superficie avec de nombreux débris de Végétaux, feuilles de laurier, etc...

DÉPOT DES MATIÈRES ORGANIQUES. — La présence des matières organiques caractérise les vases. Dans nos échantillons elles affectent l'aspect d'un gel noirâtre, colloïdal, la teinte noire est due aux sulfures qui les accompagnent. Elles jouent le rôle de liant [Bourcart et Francis-Bœuf, 1942]. Elles englobent dans leur pâte des matériaux hétérogènes plus grossiers et confèrent une grande ressemblance apparente à tous les prélèvements, même lorsque leur constitution minéralogique et chimique diffère. Ceux qui en bœaux se présentaient sous un aspect identique avaient des teneurs en matières organiques très voisines, mais pouvaient différer par leurs autres caractères.

Leur dosage posait un problème qui n'a pas été complètement résolu. Les analyses de carbone et d'azote n'ont pas été possibles, faute de laboratoire spécialisé. Nous nous sommes contentés d'une méthode proposée par Y. Jouin pour le dosage total par chauffage, procédé discutable, mais très simple, qui permet au moins de classer les 18 échantillons. M^{me} L. Visse a bien voulu doser l'azote de trois échantillons.

Y. Jouin commence par éliminer l'eau à 110° ; il s'arrête encore à 180° pour se débarrasser de certains sels instables tels que le chlorure de magnésium ; il admet qu'à 300° ce sont surtout les matières organiques qui disparaissent¹. Cependant certains minéraux argileux, les montmorillonites, perdent leur eau zéolithique à cette température.

Lac Nord. Les prélèvements 1, 2 et 3 sont homogènes. Leur pourcentage, élevé dans notre série, n'a rien d'exceptionnel en lui-même. J. Bourcart [Bourcart et Francis-Bœuf, 1942] donne quelques exemples, dont

1. Au laboratoire de A. Rivière, des calcinations expérimentales ont montré que l'erreur relative était de l'ordre de 5 %.

j'extrais les trois suivants : vase de l'estuaire du Bou Regreg (Maroc) : 5 % ; vase du littoral de la mer du Nord : 5 à 10 % ; vase lacustre de la région de Moscou : 10 à 90 %.

Fond du golfe. Le point 4 dans l'axe du canal est le plus chargé de la série en matières organiques avec 10 %. Si le canal de La Goulette diffère d'un estuaire, parce qu'il n'est pas le lieu de rencontre d'eaux douces et salées, il s'en rapproche en ce sens que les petites marées et les vents produisent des courants assez violents. Ces phénomènes hydrodynamiques d'aspect estuarien peuvent provoquer un dépôt de vases, chaque fois que la charge mise en suspension dépasse la capacité de transport variable avec les renversements et les changements de courants. La Gironde, dont la sédimentation vaseuse et sableuse a été étudiée par L. Glangeaud [1938], présente un exemple de ce phénomène.

N° D'ORDRE DES ÉCHANTILLONS	110° EAU	180° COMPOSÉS INSTABLES	300° MATIÈRES ORGANIQUES	AZOTE
1	59,58 %	0,46 %	8,19 %	0,77 %
2	61,26	0,55	8,58	
3	52,68	0,52	9,24	
4	44,03	1,54	10,61	
5	23,33	0,17	3,10	0,73
6	17,04	0,09	2,09	
7	23,00	0,41	6,63	
8	64,59	1,83	7,62	
9	64,74	0,83	7,70	
10	71,70	1,29	6,29	
11	39,72	0,81	6,36	
12	57,91	1,04	7,59	
13	30,14	0,56	4,87	
14	25,82	0,54	4,24	
15	57,84	1,08	8,28	0,64
16	37,15	0,81	4,81	
17	27,20	0,41	2,95	
18				

TABL. 11. — Matières organiques.

Les prélèvements 5, 6 et 7 dans le golfe, au large de la plage de La Goulette, sont plus pauvres. Ils décèlent cependant une formation indubitable de vase.

Lac Sud. Les échantillons se classent en : éch. 15, 9, 8, 12 > 7,50 % ; éch. 11 et 10 compris entre 7 et 5 % ; éch. 13, 16, 14 et 17 < 5 %.

Les prélèvements chargés 8, 15 et 12 se situent dans des anses au fond de la lagune. C'est là que les eaux sont les plus stagnantes et que l'action des vents peut chasser les particules ténues colloïdales. Elles s'y accumulent et trouvent l'immobilité nécessaire à leur descente vers le fond à travers environ 1 m d'eau, et à leur sédimentation.

Les points 9 et 10 sont en relation avec des prairies d'Ulves. Pour le n° 10, l'eau limpide laissait voir les thalles développés, formant des voiles très fins recouvrant le fond. Dans ce milieu riche en substances végétales, le gel formé avait une épaisseur de un à plusieurs décimètres, le prélèvement était très noir.

La station 11 se situe à l'emplacement de la Nouvelle Brèche, là où l'eau suffisamment oxygénée permet un grand développement animal. Les autres points, éloignés des eaux dormantes et où ni la flore ni la faune ne sont particulières, s'avèrent plus pauvres.

MAGNÉSIE ET SÉDIMENTATION DOLOMITIQUE. — L'analyse fait apparaître le magnésium sous forme de MgO, mais comme le calcium il est combiné sous forme de carbonates.

Le classement par teneurs décroissantes en MgO donne :

n° 10 = 2,79 %	n° 3 = 1,88 %	n° 14 = 1,08 %
1 = 2,71	12 = 1,86	5 = 0,99
9 = 2,57	18 = 1,84	17 = 0,98
2 = 2,44	4 = 1,80	11 = 0,87
15 = 2,42	16 = 1,78	6 = 0,82
8 = 2,38	7 = 1,20	13 = 0,79

et, pour le lac Sud, les échantillons se classent en : éch. 10, 9, 15 et 8 compris entre 2,5 et 3 % ; éch. 12, 18 et 16 entre 2 et 1 % ; éch. 14, 17, 11 et 13 < 1 %.

En comparant avec le tabl. 11 il apparaît que le MgO est étroitement lié au pourcentage en matières organiques.

Exprimé en pourcentage de MgO relativement au CaO, on obtient les valeurs suivantes pour les échantillons des trois provenances.

Lac Sud	Lac Nord	Golfe
9 = 16 %	1 = 10,7 %	4 = 9 %
10 = 15,7	2 = 10,3	5 = 4,55
8 = 14	3 = 7	7 = 4,3
15 = 12		6 = 3,8
18 = 10		
12 = 8		
13 = 3,9		
17 = 3,6		
11 = 3,4		
14 = 3,2		

Pour de nombreux échantillons, le MgO représente un pourcentage important de CaO. De même que la teneur brut en MgO, le pourcentage reste pratiquement proportionnel à l'abondance des matières organiques. Pour G. Lucas, la dolomie ne se formerait que sous un pH très basique. Or certaines amines quaternaires organiques peuvent élever le pH. Il cite [1948 b] *l'hydroxyde de tétraméthylammonium* dont l'alcalinité est semblable à celle de la soude. Les expériences de Lucas expliquent donc la richesse en magnésie de la sédimentation du lac par une formation de dolomie, et justifient parfaitement les relations constatées entre les proportions de MgO et les teneurs en matières organiques.

En outre, la valeur du rapport $\frac{\text{MgO}}{\text{CaO}}$ varie à peu près en raison inverse des quantités de CaO.

Pour les trois échantillons du lac Nord, $\frac{\text{MgO}}{\text{CaO}}$ décroît depuis le n° 1 jusqu'au n° 3, tandis que croît la richesse en CaO ; dans le lac Sud l'échantillon 14, exceptionnellement riche en CaO, montre le pourcentage le plus faible en MgO. A. Rivière [1940] avait observé, que lorsque du CO_3Ca fixe du Mg, il se dégage du CO_2 qui abaisse le pH et arrête tout de suite la réaction s'il n'est pas éliminé. Il semble ici que le CO_3Ca fixe effectivement du Mg pour former de la dolomie, et il est possible que le dégagement immédiat en CO_2 soit d'autant plus abondant qu'il y a davantage de calcaire dans la vase.

Mais la réaction peut se continuer malgré le CO_2 dégagé, si elle s'effectue en présence d'Algues. A. Rivière poursuivait en effet sa communication en montrant le rôle des Algues, dont l'assimilation chlorophyllienne pourrait fixer le CO_2 au fur et à mesure de sa formation ; si bien qu'une lagune sursalée et riche en Algues (comme est précisément le lac de Tunis) serait le milieu de dolomitisation idéal. Dans le lac la réaction est sans doute ralentie lorsque le dégagement de CO_2 , augmentant avec la teneur en calcaire, devient trop élevé pour les besoins de l'assimilation chlorophyllienne. Remarquons que le prélèvement 4 dans le canal de La Goulette, pourtant chargé en matières organiques mais privé d'Algues, ne contient que peu de magnésium en dépit de sa faible teneur en CaO.

Trois facteurs font du lac de Tunis un site favorable à la dolomitisation : la salure, l'abondance des matières organiques, la prolifération des Algues qui s'ensuit. Si les eaux du lac de Tunis sont effectivement alcalines, il faut ajouter toutefois que l'abondance des matières organiques

ne suffit pas nécessairement à élever le pH, car les acides sulfhydrique et organiques qui les accompagnent peuvent neutraliser les bases organiques et l'ammoniaque.

SÉDIMENTATION PHOSPHATÉE. — Parmi les sels minéraux j'ai pensé à chercher si les vases ne s'enrichissaient pas en phosphates. Retourné sur le lac en 1953, j'ai effectué à cet effet un prélèvement dans le lac Nord et un autre dans le lac Sud aux emplacements 2 et 8, où la vase est fine et chargée en matériel organique. Y. Jouin a recherché le phosphate par une méthode spectrographique. Il trouve : lac Nord : 0,10 % ; lac Sud : 0,25 %.

Les traces de phosphates trouvées dans le lac Nord peuvent être rapportées directement au déversement des égouts, mais pas celles du lac Sud.

SÉDIMENTATION DU FER. — Les sulfures forment des combinaisons avec le fer, et les deux études ne sont pas séparables. La présence de composés sulfurés dans les vases est due aux matières organiques qu'elles contiennent ainsi qu'à la réduction anaérobie des sulfates ; tous les auteurs les rattachent à l'action des bactéries anaérobies.

Au cours des analyses, le grillage à 900° oxyde les sulfures pour donner du SO_3 . Les pourcentages de SO_3 indiquent seulement les teneurs relatives en soufre des échantillons et permettent leur classement. Les prélèvements 1, 2, 3 du lac Nord sont parmi les plus chargés, mais ceux du lac Sud, quoique n'étant pas formés dans un milieu aussi sulfuré, n'en sont nullement dépourvus. Le point 4 dans le canal, très riche en matières organiques, est pauvre en sulfures. Là, les courants d'eau venant du golfe et chargée d'oxygène ont remué les vases, et y ont empêché l'anaérobiose, tout au moins dans la zone superficielle accessible au dragage. L'échantillon n'était pas noir ni gris, mais de teinte brune, simulant une argile.

Les analyses à 900° ne renseignent que très imparfaitement sur le fer sédimenté en même temps que les vases sous forme de sulfure de fer, parce qu'elles englobent avec lui le fer lié aux réseaux des minéraux argileux allogènes. Le premier est le fer libre, l'autre le fer fixé. Au laboratoire d'A. Rivière j'ai dosé le fer libre ou *fer naissant* en le rendant soluble par réduction. La méthode avait déjà été mise au point et utilisée avec succès par R. Lafond.

Elle consiste à faire barboter à froid un courant d' H_2S dans de l'eau distillée où a été préalablement dispersé 1 g de la vase à doser. On libère ensuite H_2S avec HCl et le fer réduit passe à l'état de chlorure ferreux soluble ; on facilite en chauffant au bain-marie. Le liquide recueilli par centrifugation sera dosé par une méthode colorimétrique. A cet effet on en prélève une quantité déterminée qui sera colorée par 1 cm^3 de sulfocyanure de potassium en présence de NO_3H et de HCl 1/10. On obtient une solution rouge cerise. Arrivé à ce stade il est nécessaire de disposer d'une cellule photo-électrique et de l'étalonner au préalable avec des solutions-témoins. Dans le cas particulier de mes dosages, ils se sont vus simplifiés parce que j'ai trouvé un électrophotocolorimètre pour lequel une courbe étalon avait été construite par M^{lle} S. Vernhet.

N° D'ORDRE DES ÉCHANTILLONS.....	1	9	11	4	18
Grillage des sulfures : SO_3	0,88 %	0,75 %	0,45 %	0,40 %	1,21 %
Fer total analysé à 900° : Fe_2O_3	4,48	5,37	2,96	5,45	6,16
(1) Réduction par H_2S : fer soluble...	1,25	1,22	1,05	1,65	0,90
(2) Après destruction préalable des matières organiques : par NaOH : fer soluble.....				2	1,32
(3) Après destruction et oxydation des matières organiques par H_2O_2 : fer soluble.....		1,3		2	2,1

TABL. 12. — Dosage du fer.

Le tableau donne le résultat pour les cinq échantillons étudiés et les compare aux teneurs totales en fer.

Les valeurs sont remarquables, à la fois parce qu'elles restent inférieures aux teneurs en fer total et parce qu'elle ne sont pas proportionnelles à ces dernières. La vase 18, la plus riche en fer total parmi les 18 prélèvements, se trouve en même temps la plus pauvre en fer soluble. En recommençant les mesures j'ai retrouvé des résultats semblables. Il semble donc, qu'en plus de la fraction soluble et d'une certaine quantité liée aux mailles réticulaires des minéraux argileux, le fer puisse exister sous un troisième état. On est amené à supposer qu'il est encore en combinaison organique et contenu dans de lourdes molécules résistantes à l'acide sulfhydrique. Pour le vérifier, j'ai détruit partiellement les matières organiques des vases analysées en les traitant préalablement à chaud avec NaOH 10 %. L'action est complétée par des lavages à l'eau distillée, en séparant par centrifugation la vase du liquide de la suspension jusqu'à un début de défloculation. Le culot de centrifugation est ensuite redispersé dans l'eau distillée. Un dosage en fer soluble (2) est effectué comme précédemment ; les teneurs ont augmenté. La destruction des matières organiques a donc libéré une fraction supplémentaire de fer soluble, dont une partie au moins s'est trouvée conservée dans le culot de centrifugation, au lieu d'être éliminée avec le filtrat.

J'ai procédé également à une attaque plus énergique des matières organiques. Celles-ci sont détruites par la soude concentrée en milieu oxydant, en présence d'eau oxygénée pure. Après quoi le lavage jusqu'à défloculation est d'abord effectué avec HCl N/10 puis N/100. Les teneurs en fer soluble (3) sont augmentées une deuxième fois ; plus que doublées pour l'échantillon 18, elles se rapprochent des proportions relatives du fer total.

On remarquera, en comparant aux résultats donnés par le grillage, que les teneurs en fer soluble après simple réduction (1) sont inversement proportionnelles aux pourcentages en SO_3 . La vase 4, bien pourvue de matières organiques mais la plus pauvre en sulfures, est la plus chargée en fer soluble ; la vase 11, pauvre en sulfures, est également assez bien partagée en fer soluble, quoique très déficiente en fer total. Cette relation simple disparaît après la destruction des matières organiques. Il semble donc que le fer libéré par la division des lourdes molécules organiques ait été également contenu dans celles-ci en combinaison complexe avec des sulfures.

Après examen des culots de centrifugation, pour séparer l'ensemble du fer combiné de celui des minéraux argileux, il ne reste plus qu'à doser la fraction éliminée avec le filtrat. Le filtrat provenant de la destruction des matières organiques en milieu oxydant est alors recueilli ; le procédé consiste à détruire au préalable les résidus organiques entraînés à l'état soluble par une ébullition en présence de NO_3H 1/10. La réduction par H_2S et le dosage s'effectuent comme précédemment. Pour la vase 4, par exemple, on trouve 1,05 % ; en ajoutant cette valeur aux quantités dosées précédemment dans la fraction solide séparée par la centrifugation, soit 2 %, cela donne en tout 3,05 % de fer libre, et par différence 2,40 % de fer fixé aux argiles.

Mais les observations les plus intéressantes résultent du fait que tous les échantillons ne réagissent pas de la même manière à la soude et à l'eau oxygénée. Si, chaque fois, les teneurs en fer soluble augmentent parce qu'il s'y ajoute les quantités mises en liberté par la destruction des matières organiques, l'augmentation n'est pas semblable pour les cinq échantillons. Ceux-ci ont été choisis parmi les 18 prélèvements pour leurs conditions de dépôt aussi variés que possible :

N° 1 — Lac Nord au voisinage des égouts : proliférations organiques animales et végétales, sels minéraux, eau parfois anaérobie.

N° 9 — Champs d'Algues du lac Sud : richesse organique, eau déficiente en oxygène, jamais anaérobie.

N° 11 — Brèche de la digue : le milieu lagunaire est perturbé par un courant marin oxygéné en provenance du canal.

N° 4 — Centre du canal de La Goulette (14 m de profondeur) : courants vifs dans l'axe du canal, richesse organique.

N° 18 — Slikke du lac Sud en cours de diagénèse.

C'est la façon dont ces cinq vases répondent à nos manipulations qui constitue le fait nouveau. Les substances organiques renfermées dans la vase 9, en cours de dépôt, sont encore fraîches et elles ont résisté aux opérations chimiques *in vitro*, même à l'oxydation par H_2O_2 ; les pourcentages en fer soluble n'ont augmenté que faiblement (de 1,22 à 1,30). Mais la phase organique des vases 4 et 18 peut subir deux évolutions différentes. La vase de la slikke du lac Sud n° 18, à l'abri d'une pellicule superficielle imperméable, reste très réductrice et les matières organiques se dessèchent lentement sans s'oxyder. Elles deviennent vulnérables à la soude et plus encore à l'eau oxygénée ; aussi leur destruction progressive augmente les pourcentages en fer dosable de 0,9 à 1,3 et 2,1. Au contraire, l'échantillon 4 a été bouleversé et oxygéné par les courants du canal de La Goulette. Les matières organiques sont déjà oxydées et détruites sur place, si bien que l'oxydation supplémentaire *in vitro* par H_2O_2 n'augmente plus les teneurs en fer.

Ces résultats, pour fragmentaires qu'ils apparaissent encore, appellent une interprétation d'ordre général. La slikke du lac Sud (éch. 18) commence une diagénèse en milieu réducteur. Les micro-organismes périssent seulement sous l'effet de la dessiccation et les matières organiques peuvent se décomposer lentement, en permettant la formation de sulfures de fer. On connaît des hydrates de sulfures de fer naissants définis ; W. H. Twenhofel [1939] en cite trois. *L'hydrotroïlite*, monosulfure hydraté (FeS, nH_2O) est un colloïde hydrophyle noir. C'est à lui qu'il faut attribuer la teinte noire caractéristique. La formation des deux autres sulfures de Twenhofel débute également avec la sédimentation, mais se poursuit au cours de la diagénèse. On remarque précisément que l'échantillon 18 est le plus riche en soufre, ce qui laisse supposer un enrichissement effectif en hydrates de sulfures de fer. Ces composés hydratés devraient pouvoir cristalliser ultérieurement en pyrite et en marcassite. Il est certain toutefois que les vases prélevées à la drague, à la surface du dépôt, sont trop fraîches pour renfermer de la pyrite native : mais effectivement les sondages, dont les coupes seront décrites en IV de ce chapitre, découvrent une grande abondance de nodules de pyrite et démontrent que les conditions régnant dans les vases du lac de Tunis favorisent leur genèse. Pour conclure, on peut dire que ces analyses ont fait ressortir que les vases contenaient le fer sous trois formes : fixé aux argiles, renfermé probablement sous forme de sulfures complexes dans les molécules organiques, et enfin libre à l'état de sulfures définis ; et tout semble prouver en outre, que les sulfures sont en voie de déshydratation et qu'ils se transforment à la fin de la diagénèse en cristaux.

Au contraire, dans le canal de La Goulette (éch. 4), les floculations vaseuses sont bouleversées et oxydées. Là, la diagénèse ne peut aboutir qu'à des oxydes de fer, limonite ou magnétite. Rappelons que cette vase n'est plus noire, mais d'une teinte brun rougeâtre.

Le cas de la slikke du lac Sud est celui d'une régression, tandis que les courants qui se produisent dans le canal de la Goulette, creusé de main d'homme, imitent plutôt les phénomènes qui peuvent accompagner une transgression. Les pyrites de fer sédimentaires seraient un minéral formé au cours de régressions marines accentuées accompagnées de subsidences, mais sans perturbations du domaine continental qui risqueraient d'oxyder les vases ; leur rareté relative résulterait du caractère complexe des conditions réclamées. Les oxydes de fer sédimentaires pourraient, entre autres genèses possibles, prendre naissance au cours des transgressions marines envahissant un littoral lagunaire.

III. Étude granulométrique.

Méthodes. — Observations à partir des courbes cumulatives. — Indices granulométriques de A. Rivière (lac de Tunis, bassin alluvionnaire de la Manouba-Sedjoumi). — Variations granulométriques en fonction de la distance au rivage, établissement d'un nouveau procédé de représentation. — Aspect granulométrique de l'évolution littorale. — Conclusion.

Si les carbonates de calcium et de magnésium ainsi que les composés ferrugineux résultent surtout de phénomènes de précipitation biologiques ou chimiques, les matériaux siliceux ou argileux qui constituent une part importante des sédiments ont une origine essentiellement détritique. Leur étude granulométrique est faite ici.

MÉTHODES. — Les vases ont été analysées à Tunis par les soins d'Y. Jouin, d'abord sur une colonne de tamis. Pour la fraction fine il a été obligé de recourir à la méthode du densimètre. Cette méthode consiste à immerger un flotteur dans une suspension, dont la densité diminue à mesure que les particules se sédimentent. La vitesse de chute étant en relation avec les diamètres dans la formule de Stokes. Elle nécessiterait des calculs assez longs si des abaques ne les simplifiaient, il est nécessaire d'effectuer des corrections de température. A. Rivière [Rivière et Munier, 1948] en énumère les inconvénients. Le principe repose sur la mesure de la densité moyenne d'une tranche de liquide correspondant à la hauteur du flotteur de l'appareil, c'est-à-dire d'une tranche épaisse et, chose grave pour la précision de la méthode, du même ordre de grandeur que les hauteurs de chute des particules. Par ailleurs, le poids spécifique moyen de l'appareil (relatif à la partie immergée) variant au fur et à mesure de l'immersion, sa vitesse d'enfoncement n'est pas constante et des particules se déposent à sa partie supérieure, modifiant son équilibre. C'était la seule méthode dont je disposais à Tunis. S. Mériaux [1952] compare les mesures au densimètre à des opérations plus précises et estime les pourcentages d'erreur acceptables, mais préjuge *a priori* les formes des courbes granulométriques, et prend d'ailleurs comme base de comparaison des granulométries à la pipette effectuées dans des conditions défectueuses.

J'ai repris l'étude de la fraction fine au laboratoire d'A. Rivière. Étant donné le milieu complexe des vases, il est indispensable de purifier au préalable et c'est relativement compliqué. Les techniques de laboratoires sont décrites par A. Rivière dans l'opuscule cité.

Les matières organiques sont susceptibles — en raison de leur adsorption à l'état de colloïde protecteur — de fausser les résultats. On les détruit par l'eau oxygénée à un pH voisin de 8 ou 9. Le lavage est complété en séparant par centrifugation l'argile du liquide de la suspension. Le culot de centrifugation est ensuite redispersé dans l'eau distillée. On se débarrasse également des bases échangeables et des fragments de coquilles par adjonction d'HCl 1/10, en abaissant le pH jusqu'aux environs de 2. On lave à l'eau distillée et on centrifuge, l'opération étant répétée jusqu'à défloculation. Dans le cas particulier de ces vases riches en fer, l'attaque acide recommencée à plusieurs reprises permet d'en faire disparaître une grande partie. On craint parfois que le lavage acide n'entraîne une attaque des colloïdes argileux, mais A. Rivière ne s'en inquiète pas, car avec un pH = 2 les concentrations en acide libre sont de l'ordre de N/100.

Le principe de la méthode consiste à laisser sédimenter une suspension. On opère sur 5 gr de sédiment sec. Après purification, la mise en suspension préalable est effectuée en agitant 15 à 17 h en présence de pyrophosphate de soude, agent dispersif énergétique, qui permet d'obtenir la défloculation et la dispersion complètes nécessaires à la détermination granulométrique correcte des fractions fines. A. Rivière avait pensé remplacer cette longue agitation par un passage dans un mélangeur à 12 000 tours/minute, mais les résultats sont modifiés (rupture des particules).

La vitesse de chute des particules est donnée par la formule de Stokes:
$$V = \frac{2}{9} \times \frac{(D_1 - D_2)}{\eta} \times g \times r^2 = C \times r^2.$$

Dans laquelle r représente le rayon des particules, D_1 leur densité, D_2 la densité du liquide et η le coefficient de viscosité. A. Rivière remarque que, pour les argiles, D_1 est affecté d'une certaine incertitude, tenant

au gonflement des particules. La constante de Stokes (C) dépend de la température. Gessner [1936] donne des tables des valeurs de C.

L'appareil de mesure utilisé au laboratoire d'A. Rivière est une pipette d'Andreasen modifiée qui permet des prélèvements par aspiration à une profondeur déterminée, décroissante en dessous de la surface à chaque prise. La profondeur initiale est réglée avec précision au moyen d'un tube capillaire, en se basant sur l'ascension rapide qui se produit dans les capillaires dès qu'il viennent affleurer la surface du liquide. On admet que l'aspiration se fait dans une tranche pratiquement horizontale à condition qu'elle soit lente et régulière. Pour des mesures très précises il y a intérêt à produire l'aspiration par l'écoulement de l'eau d'un flacon. La sédimentation s'effectue dans une enceinte calorifugée munie d'un thermostat qui permet d'opérer à température constante. La pipette, fixée à demeure sur le vase à sédimentation, est pourvue d'un robinet à deux voies et d'un tube d'écoulement latéral, permettant de recueillir les prises sans déplacements. En répétant le prélèvement aux temps $t_1, t_2, t_3, \dots$, on obtient autant de suspensions qu'il suffit d'évaporer pour avoir les différentes fractions granulométriques cumulatives.

Les temps choisis sont les suivants : 0, 2, 4, 16 minutes, 1, 2, 4, 8 heures, 1, 2, 4, 8 jours. Au bout de 8 jours, avec une hauteur de chute initiale de l'ordre de 7 cm, on prélève des particules dont le rayon est de l'ordre de 0,03 à 0,06 μ .

OBSERVATIONS A PARTIR DES COURBES CUMULATIVES. — On utilise les courbes cumulatives classiques obtenues en portant en ordonnées une échelle de pourcentage granulométrique et en abscisses les logarithmes des dimensions des particules.

Les points d'inflexion sur la courbe cumulative traduisent les hétérogénéités du sédiment. A. Rivière a précisé que si l'on voulait établir une *courbe de fréquence* expérimentale, c'est-à-dire porter en abscisse les dimensions des particules, et en ordonnées les dimensions des tamis correspondant, celle-ci ne serait correcte qu'à condition de tenir compte en ordonnées des écarts entre les fractions. Soit Δ_m le résidu d'un tamis, Δ_x la différence entre les mailles des tamis successifs,

on doit porter alors les valeurs : $y = \frac{\Delta_m}{\Delta_x}$

On ne pourrait faire abstraction des tamis que si Δ_x tendait vers 0. Mais dans ce cas y devient une fonction dérivée de x . La courbe de fréquence idéale n'est pas autre chose que la dérivée de la courbe cumulative. Par conséquent un point d'inflexion de la courbe cumulative correspond mathématiquement à un maximum de la courbe de fréquence [Rivière, 1952 b].

Signalons, toujours avec A. Rivière, un détail qui échappe généralement. Si la polydispersion oblige à utiliser des coordonnées semi-logarithmiques, les maxima représentés par les points d'inflexion se voient décalés par rapport à l'échelle granulométrique, car la dérivée de la fonction logarithmique $y = \log x$ introduit un nouveau terme en x . Les points d'inflexions des histogrammes de nos vases ont une valeur représentative, mais ne sont pas intrinsèquement exacts.

La vase du prélèvement 13 située près du cordon littoral sableux fermant la lagune, ainsi que la vase 17 près du rivage, ont des stocks sableux importants et seulement quelques traces d'argiles. De même les vases 5, 6, 7 de La Goulette à l'extérieur du cordon littoral. Les analyses portent sur la silice et l'alumine, la silice provenant à la fois des sables et des silicates des argiles, l'alumine uniquement des argiles :

	Silice	Alumine
Éch. 13	53,9 %	1,22 %
17	46,53	néant
5	53,25	4,10
6	56,84	1,10
7	37,58	4,64

La présence des sables entraîne une inflexion brutale des courbes, surtout quand il s'agit de ceux des cordons littoraux très monodispersés (fig. 29 A).

Les prélèvements de vase du lac Nord ainsi que ceux du centre du lac Sud sont fins. A proximité du rivage, le matériel alloène a subi un transport plus faible et il est dans l'ensemble plus grossier, mais il se trouve compliqué d'un enrichissement en ultra-fin, que l'on peut opposer à un appauvrissement central. Ces caractères s'harmonisent à de nombreux autres du même ordre observés au laboratoire d'A. Rivière [Rivière, Pimienta, Razavet, Fridman et Vernhet, 1952]. Ils correspondent toujours à des nappes d'eau de faible profondeur, dans lesquelles nous pensons que les sédiments du fond sont périodiquement remis en suspension par les vagues des tempêtes. Ce sont naturellement les fins et ultra-fins qui restent en suspension le plus longtemps et ont le plus de chances d'être entraînés par les mouvements des eaux d'origine quelconque

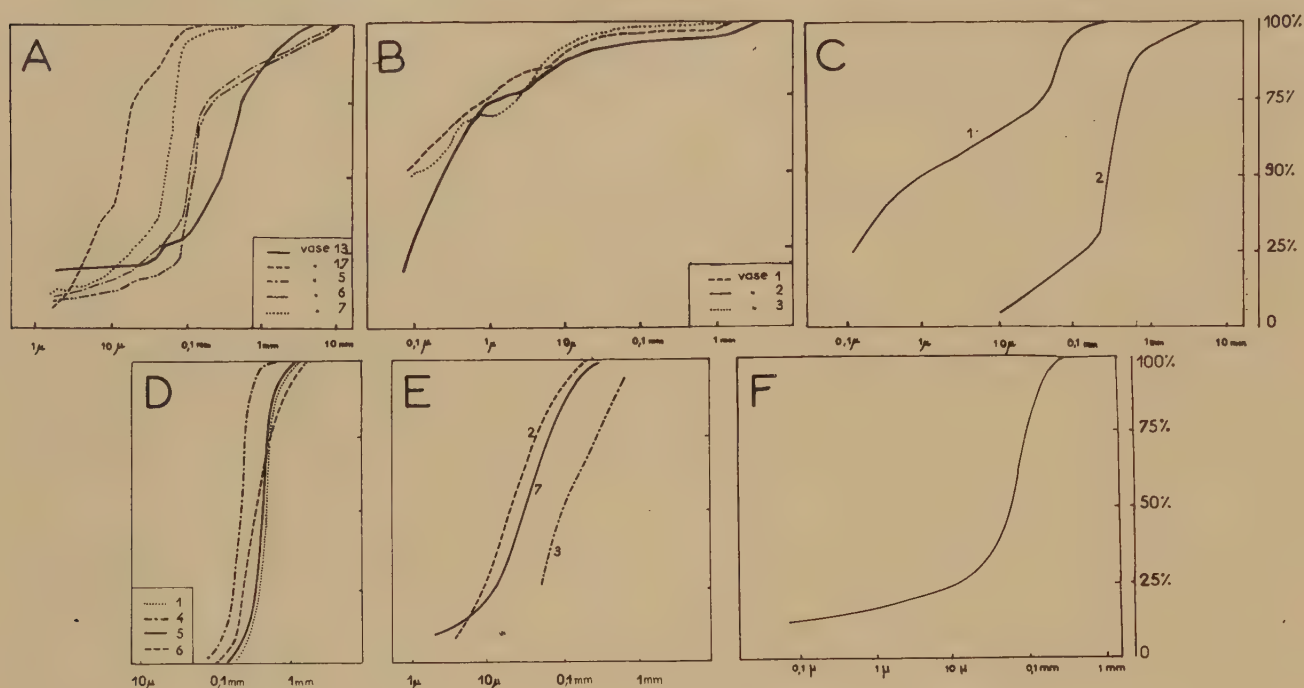


FIG. 29. — Courbes granulométriques cumulatives avec des abscisses logarithmiques.

A et B : Vases des lacs de Tunis (A : lac Sud ; B : lac Nord).

C : alluvions fluviales du bassin de la Manouba. 1 : carotte argileuse de sondage prélevée entre — 96 et — 112 m (sous le niveau de la mer) ; 2 : sable d'un « drain naturel » entre — 86 et — 111 m, recueilli au développement.

D et E : formations littorales du delta de la Medjerda, prélevées suivant un alignement normal au rivage.

F : déplacement des argiles dans un drain sableux dû à des circulations d'eau (Tunisie orientale, région du Chaal).

(vents ou marais), d'où un appauvrissement en ces catégories de particules, appauvrissement d'autant plus accentué que les actions ont été plus prolongées, entraînant par la même occasion une augmentation de la proportion relative des éléments grossiers. Cela définit un type sédimentaire soumis après dépôt à une *lévigation* prolongée et indique des périodes de sédimentation lente, de remaniements de profils d'équilibre lagunaire accompagnés ou non d'érosion du fond.

Les vases 1, 2 et 3 du lac Nord présentent un palier entre 3 et 1 μ , qui indique selon toute vraisemblance un mélange de quartz très fin et d'argile (fig. 29 B). Voici les analyses :

	Silice	Alumine
Éch. 1	26,10 %	10,12 %
2	25,90	9,36
3	23,40	9,62

L'enrichissement en fin des bordures augmente la proportion du stock argileux qui atteint 85 % du poids total, tandis que vers le centre il passe à 75 % puis à 70 %. Mais, en même temps, la finesse de l'ensemble croît régulièrement vers le centre et le palier entre les deux stocks passe de 3 à 1 μ . Un nouvel accroissement en ultra-fin de la vase 3 résulte peut-être de la proximité de l'île Chekli.

INDICES GRANULOMÉTRIQUES DE A. RIVIÈRE. — Réfléchissant sur la signification des arrangements des roches meubles dans une publication récente, A. Rivière [1952 c] a constaté que les courbes granulométriques sont des représentations d'étapes successives d'un phénomène naturel continu. Compte tenu de cette continuité ainsi que du fait que certaines des étapes de l'évolution granulométrique peuvent être représentées par des fonctions simples (linéaires et logarithmiques), un raisonnement analytique le conduit à la formule générale : $y = fax^n dx$.

Suivant les valeurs de n , les granulométries peuvent s'exprimer par des fonctions linéaires, paraboliques, logarithmiques ou hyperboliques : n est l'*indice d'évolution*.

Il introduit par ailleurs le rapport entre le diamètre maximum dM et le diamètre minimum dm des particules : $G = \log \frac{dM}{dm}$; le logarithme $g = \log G = \log \frac{dM}{dm}$ est l'*indice de classement* ; n et g seront les *indices granulométriques*.

A. Rivière y ajoute un *indice de faciès* : le produit Ng avec $N = n + 1$ (lequel n'est d'ailleurs pas indépendant des premiers), et l'*indice d'évolution* du sédiment : $n = N - 1$.

On commence à disposer d'exemples de faciès granulométriques dans les étangs de Camargue [Rivière, Pimienta, Razavet, Fridman et Vernhet, 1952], et le bassin de La Vilaine [Lafond, 1953]. Ici nous examinerons les faciès granulométriques successivement pour les vases marines du lac et pour les dépôts de crue remplissant le fossé en subsidence de la Manouba-Sedjoui.

LAC DE TUNIS. — Pour calculer Ng il faut ramener les courbes à la *forme canonique* de A. Rivière, c'est-à-dire choisir des échelles telles que 100 unités d'ordonnées correspondent à g sur les abscisses. La limite des ultra-fins n'est jamais atteinte expérimentalement mais les résultats de R. Lafond ont montré qu'on pouvait admettre que le point $g = 0$ se situe dans le prolongement de la courbe. Aux extrémités, la dispersion aléatoire produit sur la courbe des inflexions, dont il n'a pas été possible jusqu'ici de tenir compte.

Le calcul a été fait pour les vases 1, 2, 3, 8 et 12 (fig. 30 A). L'échantillon 12, situé dans une zone sableuse et près du rivage, est logarithmique. Par contre, par suite de leur déficience en ultra-fins, les autres vases plus centrales sont hyperboliques et d'autant plus qu'elles sont plus écartées du rivage ; leur indice Ng croît très régulièrement avec leur éloignement de — 0,5 à — 1,7. Le classement hyperbolique n'est jamais atteint dans les estuaires. Il caractérise normalement les grands bassins de décantation des argiles kaoliniques [Rivière, 1952 c]. S'il est possible en lagune, c'est sans doute à cause de l'abondance des matières organiques qui assureraient le maintien de la défloculation. En effet, les minéraux argileux ont été identifiés par leurs spectres roentgénographiques, il s'agit d'illite et de kaolinite, et d'après A. Rivière et S. Vernhet [1951] les matières organiques donnent une protection suffisante pour permettre le transport du mélange kaolino-illitique à l'état défloculé. Il a d'ailleurs été impossible d'observer un enrichissement en kaolinite vers le centre. La vase 8 avec $Ng = -1$ est plus centrale que la vase 2 avec $Ng = -1,7$, mais cette dernière provient du lac Nord particulièrement chargé en matières organiques et où la défloculation de la kaolinite est la plus favorisée.

BASSIN ALLUVIONNAIRE DE LA MANOUBA-SEDJOUMI. — Les argiles et sables du remplissage alluvial ont été analysés en même temps que les vases du lac. La fig. 30 B donne les courbes ramenées à leur *forme canonique*. On commencera par le sédiment actuel dont on connaît la formation, la boue bleue de la Sebkra Sedjoui (n° 1). Alignée en coordonnées semi-logarithmiques elle est parfaitement logarithmique. Elle correspond à une décantation par excès de charge. Toute défloculation étant d'ailleurs impossible dans un milieu aussi salifère.

Les autres échantillons (2 et 3) sont des limons et argiles prélevées dans les carottes de sondage et se distribuent sur une coupe verticale de 0 à 580 m sous le niveau de la mer.

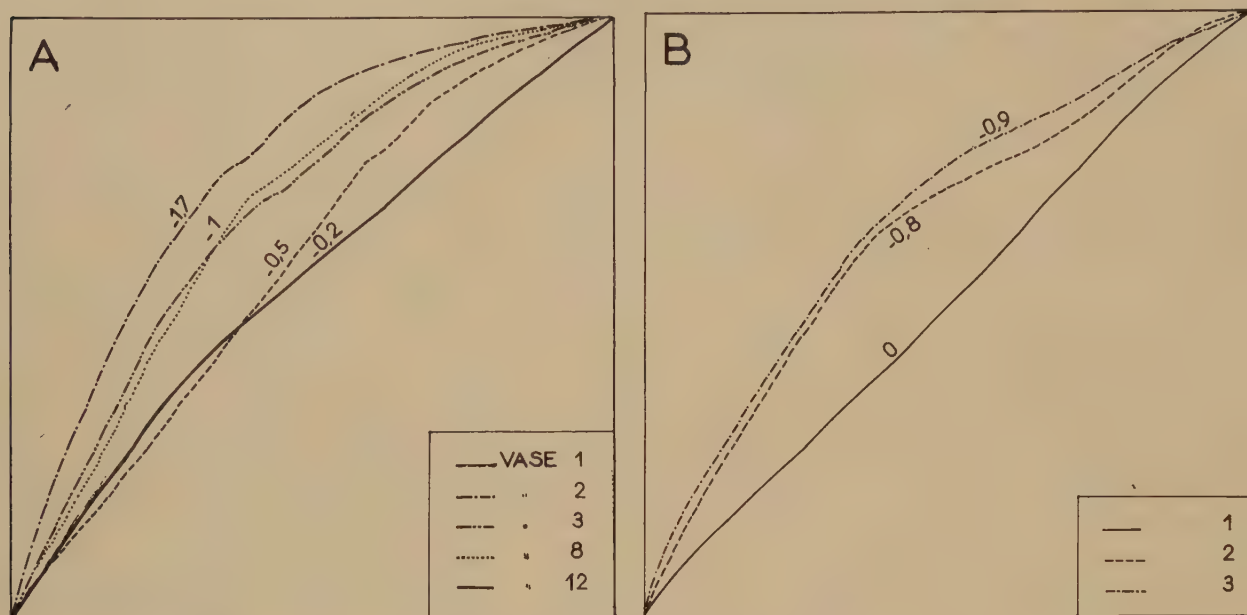


FIG. 30. — Courbes granulométriques canoniques.

A : lagune de Tunis.

B : alluvions fluviales du bassin de la Manouba. 1 : sol de la Sebkra Sedjoui ; 2 : carotte de sondage prélevée entre — 139 et — 143 m (sous le niveau de la mer) ; 3 : carotte prélevée à — 580 m, base du « Mogul », point extrême reconnu.

Ces sédiments se sont déposés antérieurement à la fermeture de la vallée de Tunis, quand l'endoréisme était moins rigoureux, par conséquent en milieu sans doute modérément salé. Les n°s 2 et 3 doivent correspondre à des champs d'épandage de crues, où la décantation non gênée par les sels a atteint le faciès hyperbolique. Parvenu à ce degré de résolution tout est très simple. Chaque élément du paysage se reflète dans la courbe granulométrique et chaque granulométrie trouve une explication régionale immédiate. Les définitions mathématiques de faciès de A. Rivière s'appliquent avec une rigueur inespérée, et les particularités régionales actuelles observées ou anciennes reconstituées s'expliquent clairement, quel que soit l'aspect sous lequel on les envisage.

De 96 à 102 m il y a un point d'inflexion entre les diamètres 2 et 3 μ , si accusé qu'il interdit le calcul des indices. On ignore l'explication, qu'il s'agisse de ruptures de berges, de mélanges de crues ou peut être de diagénèse. La dernière courbe est celle d'un échantillon très différent : un sable d'un des drains naturels. Sa non dispersion peut provenir d'un triage près d'une berge de l'ancienne Medjerda (fig. 29 C).

VARIATIONS GRANULOMÉTRIQUES EN FONCTION DE LA DISTANCE AU RIVAGE. — ÉTABLISSEMENT D'UN NOUVEAU PROCÉDÉ DE REPRÉSENTATION. — Nous avons déjà signalé que la finesse des particules augmentait vers le centre ; nous

allons le préciser et c'est à partir des 11 prélèvements du lac Sud que ce sera le plus complet. L'analyse chimique montre que les échantillons des bords 13 et 17 sont sableux, tandis que les échantillons centraux 18, 8, 9, 10, 15 sont argileux ¹.

Les courbes indiquent l'accroissement progressif de la finesse. Cela résulte des vicissitudes du transport, les éléments les plus fins parvenant le plus loin, soit par roulement, soit par suspension, soit par flottation. Quant au véhicule qui a d'abord entraîné les matériaux jusqu'aux berges, nous le connaissons déjà : les eaux de ruissellement qui érodent les collines pliocènes et qui viennent terminer leur course dans le lac.

Dans un tel cas il est intéressant de figurer la composition granulométrique de l'ensemble au moyen d'un seul diagramme, en fonction de la distance au rivage. Sur les indications de A. Rivière, nous avons porté en abscisses les distances au rivage, et en ordonnées pour chaque échantillon les abscisses (arithmétiques ou logarithmiques) des courbes cumulatives correspondant aux proportions 50 % (médianes), 25 % et 75 % (quartiles) de la masse totale de cet échantillon. En joignant les points correspondants pour les différents échantillons récoltés, on obtient un faisceau de courbes traduisant les variations granulométriques du sédiment en fonction du facteur considéré ².

La fig. 31 montre l'augmentation de la finesse moyenne vers le centre du lac. Alors que les courbes construites à partir d'une échelle arithmétique des dimensions des particules sont fortement convergentes (fig. 31 A), celles qui ont été construites à partir d'une échelle logarithmique des dimensions des particules sont à peu près parallèles (fig. 31 B). Ce résultat d'une importance générale peut se traduire en disant que la différence des logarithmes des dimensions q^1 et q^2 des particules correspondant aux quartiles est à peu près constante ou, autrement dit, que le rapport $\frac{q^1}{q^2}$ est d'autant plus voisin de 1 que le classement du sédiment est plus poussé. Il constitue un nouvel indice granulométrique, qui est aussi un indice de classement. Par sa constance l'indice de classement $\frac{q^1}{q^2}$ est caractéristique du régime de sédimentation. Il ne diffère de l'indice plus général g que parce qu'il est établi à partir des quartiles au lieu de l'être à partir des notions non expérimentales dM et dm . Il est tout à fait significatif de constater que cet indice est différent pour la vase 17 qui doit sa finesse à son dépôt au fond d'une anse abritée, quoique près du rivage. Indépendamment des dimensions, l'indice des vases 8 et 15, au milieu des anses de part et d'autre du promontoire de Mégrine, diffère de celui des vases 9 et 10 au centre du lagon. On n'a pas tenu compte de l'échantillon 11 perturbé par la brèche accédant au canal.

D'autres recherches ont montré que la signification de la méthode est d'ordre générale. La construction de ces courbes apparaît donc comme un nouveau et puissant moyen d'analyses granulométriques. La variable portée en abscisses pourrait d'ailleurs ne pas être une distance, mais aussi bien une épaisseur dans un profil stratigraphique. Dans certains cas on concevrait qu'il soit avantageux de remplacer l'échelle arithmétique des abscisses par une échelle algébrique plus complexe (logarithmique, exponentielle, puissance...) [Rivière, 1952 b].

ASPECT GRANULOMÉTRIQUE DE L'ÉVOLUTION LITTORALE. — On complètera en mentionnant l'aspect granulométrique de l'évolution des cordons littoraux. Celui qui s'est élaboré depuis l'époque romaine pour fermer le lac de Tunis disparaît sous les déblais, il est préférable de considérer le delta actuel. L'analyse granulométrique complètera ainsi les observa-

1. 18 peut être considéré comme central à cause de la régression actuelle du rivage.

2. Exemple cité par A. Rivière [1952 b].

tions géographiques données plus loin. Si l'on retourne à la fig. 7, l'on y retrouve deux cordons littoraux avec leur talus de déferlement, celui du crochon de Foug El Oued et celui de la plage

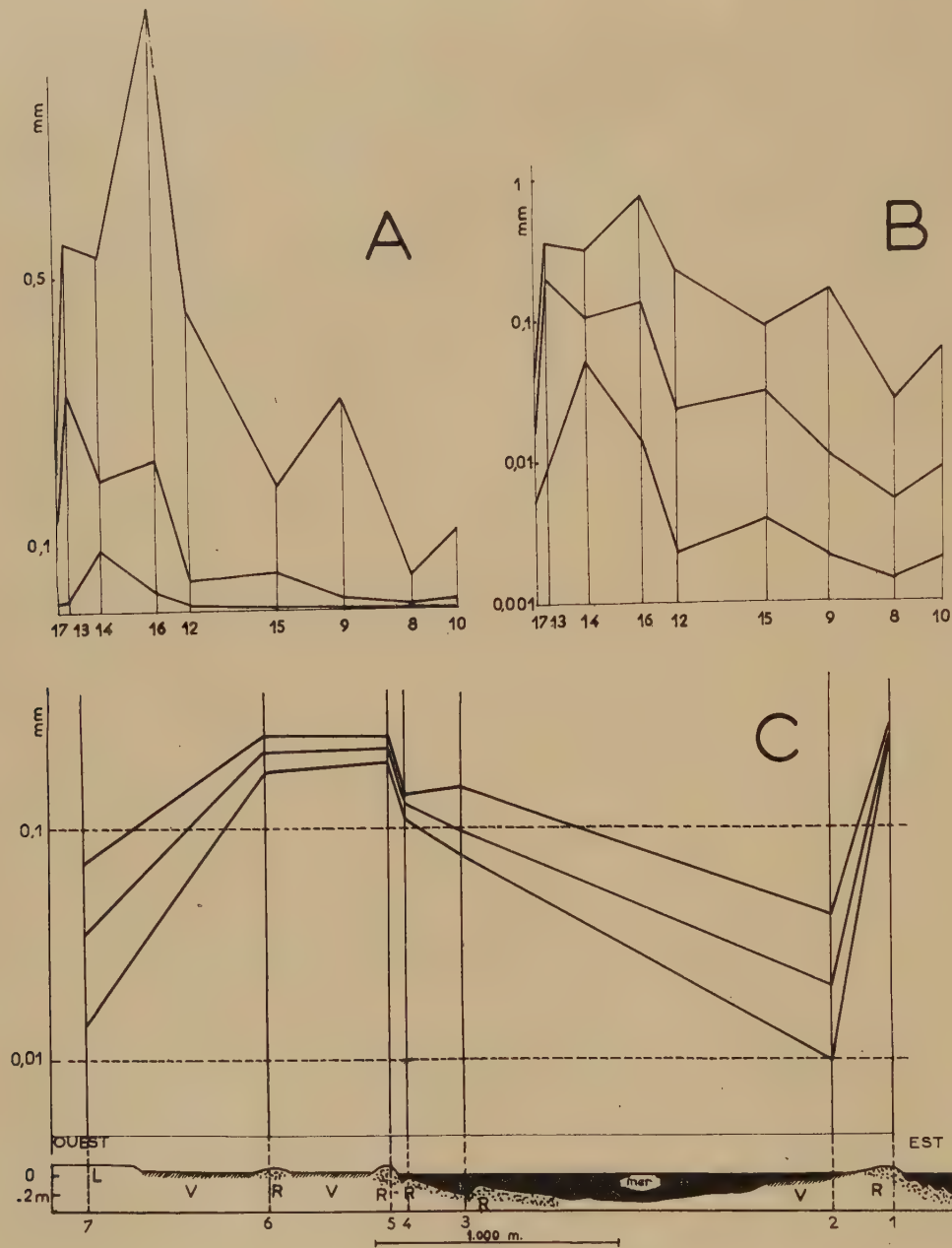


FIG. 31. — Variations granulométriques des dimensions des particules (en ordonnées) en fonction des distances aux rivages (en abscisses).

A : lac de Tunis, ordonnées arithmétiques. — B : lac de Tunis, ordonnées logarithmiques. — C : delta de la Medjerda, ordonnées logarithmiques.

La coupe du rivage deltaïque est figurée en dessous, avec les emplacements des prélèvements. L : limons fluviaux ; V : vasières ; R : cordons littoraux, plages ou rides sous-marines.

en retrait, accompagnés chacun de leur cortège de rides sous-marines, et en amont d'anciens cordons et des vasières empilées bordant un plateau de limons continentaux. L'échantillonnage se distribue sur une coupe normale au rivage :

- 1 : cordon littoral de Foum El Oued
- 2 : lagon de Foum El Oued-Vasière
- 3 : 2^e inter-ride
- 4 : 1^{re} ride sous-marine
- 5 : plage
- 6 : ancien cordon
- 7 : limon continental (une analyse suffit à les représenter car ils sont homogènes).

L'étude sous-marine systématique demande des moyens dont je ne dispose pas. Des échantillons ont pu être prélevés à la nage à faible distance du rivage, mais la récolte à la main en plongée est un peu difficile, car le sédiment tend à s'échapper du récipient au cours de la remontée. Dans les évolutions à la nage les coordonnées sont établies sans précision, mais je pense que les erreurs d'estimation ne dépassent pas 10 à 20 m. Les récoltes les plus délicates ont été celles faites dans les vasières mouvantes, submergées mais recouvertes d'une épaisseur d'eau insuffisante pour prendre appui en cas d'enlèvement.

Les analyses ont été effectuées à Tunis par tamisage et densimétrie. Les courbes sont données fig. 29 D et E. On observera la monodispersion très poussée des talus de déferlement, opposée à la polydispersion dans les vasières. Le cordon de Foum El Oued, très proche de l'embouchure, est un peu plus grossier du fait du court transport. L'ancien cordon littoral commence à se voir redispersé par les actions éoliennes.

La fig. 31 C groupe les prélèvements sur un diagramme unique. Les abscisses ne sont plus cette fois des distances métriques précises, mais représentent les positions géographiques sur la coupe orthogonale au rivage : plateau alluvial, cordons littoraux, inter-rides, rides, vasières... On y remarque un classement $\frac{q^1}{q^2}$ médiocre sur les talus de déferlement et les rides sous-marines, amélioré dans les inter-rides et les vasières. On continue surtout à observer l'opposition entre la monodispersion du talus de déferlement et la polydispersion dans le lagon et on remarque la façon dont la crête de la ride sous-marine évolue vers les caractères de l'émersion. En amont de la région où les transports marins s'accompagnent de leurs triages caractéristiques, les limons continentaux sont à la fois dispersés et homogènes.

CONCLUSION. — Dans un milieu lagunaire complexe, où les remaniements de profil d'équilibre actuels affectent une sédimentation peu abondante aujourd'hui et par là facilement modifiée, le lac de Tunis offre un remarquable type granulométrique. Le transport, en dépit de ses aléas, aboutit à un classement d'indice très précis dans les anses et découpures. La décantation conduite jusqu'au *faciès hyperbolique*, exceptionnel en milieu salé, lui confère sa physionomie la plus particulière.

IV. La diagénèse continentale des faciès lagunaires.

Water-table de l'isthme de l'Ariana. — Sondages des environs de Tunis. — Transport des sels dissous et peroxydation des matières organiques et du fer réduit dans la zone de saturation. — Faciès marins et continentaux. — Passages latéraux aux faciès gypseux. — Aspect de l'estuaire de la période manoubienne.

WATER-TABLE DE L'ISTHME DE L'ARIANA. — Le domaine continental des confins lagunaires supporte les constructions de la nouvelle ville de Tunis et se prolonge jusqu'à Carthage et Gammart par l'isthme de l'Ariana. Mieux que par une croûte de néoformation, il sera défini par les caractères que lui confère l'écoulement des eaux souterraines, car les limons et les remblais divers demeurent monotones et découragent la description géologique. Nous n'avons

pu que situer les rares dunes et les champs de vase récemment exondés. Les puits sont aussi nombreux que dans la région de la Manouba, particulièrement à l'Ariana, à la Soukra et surtout à Tunis dans la Médina, où ils ont été construits avant tout système de distribution municipale et où chaque demeure aisée possède le sien. A Tunis ils sont répertoriés systématiquement par le B. I. R. H. d'E. Berkaloff, et leur densité est telle qu'il a utilisé pour les classer le plan de la ville au 5 000^e, dont l'échelle est à peine suffisante, car la figuration de certains quartiers est surchargée. Cet inventaire peut offrir quelque intérêt administratif pour la commune, mais il est inutile à l'hydrogéologie.

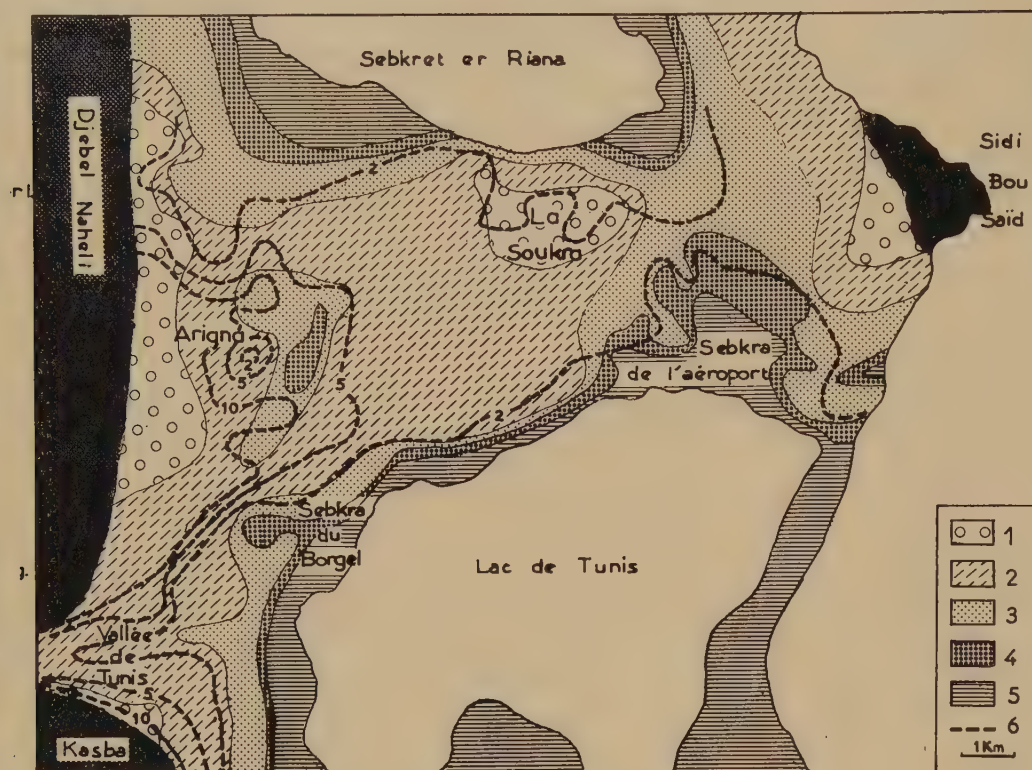


FIG. 32. — Water-table de l'isthme de l'Ariana.

1 : salure des eaux < 2 g/l ; 2 : comprise entre 2 et 4 g/l ; 3 : entre 4 et 6 g/l ; 4 : entre 6 et 8 g/l ; 5 : > 8 g/l ; 6 : courbes de niveau de la water-table.

Les eaux descendent des collines jusqu'à la plaine exondée pour rejoindre la mer (fig. 32). Elles se concentrent à mesure qu'elles avancent. Le Djebel Naheli est raviné et les cônes d'éboulis à grande circulation véhiculent les eaux. Cela se traduit par des élévations en dos d'âne de la water-table. Il y a quatre irrégularités.

1) Le pompage intensif autour de la commune de l'Ariana se traduit par une dépression en entonnoir analogue à celle de la Manouba, mais elle est au contraire accompagnée d'une diminution de salure parce que son aspiration appelle l'eau des collines bordières.

2) De même, la dune ou plage surélevée de la Soukra amène une baisse de salure, car les sables permettent l'infiltration des pluies.

3) L'influence de la vallée de Tunis est très marquée. Les cailloutis roulés par l'ancienne Medjerda ont laissé à l'emplacement du lit une zone très perméable. La pente de la water-table devient en effet très déclive à son voisinage et s'enfonce pratiquement jusqu'au niveau de la mer. Il y a là une surface drainante que le grand nombre de puits tunisois délimite sans équivoque. Elle

est accompagnée d'une augmentation de salure et particulièrement des sulfates. Certains puits montrent une prépondérance à la fois en SO_4^{--} et en Ca^{++} et obligent à supposer du gypse dans les roches encaissantes. La fig. 33 le montre à l'aide du diagramme logarithmique hexagonal. Nous savons que la présence de gypse dans un lit indique un cours temporaire disparaissant par évaporation, ce qui ne saurait être le cas de la Medjerda. Mais le barrage d'Oued Lil, qui s'est élaboré lentement sans aucune transformation « cataclysmique », n'a laissé passer qu'un débit de plus en plus médiocre. Au stade ultime, le lit parcouru seulement par les crues était parsemé de flaques stagnantes soumises à l'évaporation ; on peut l'imaginer encombré de végétation halophile.

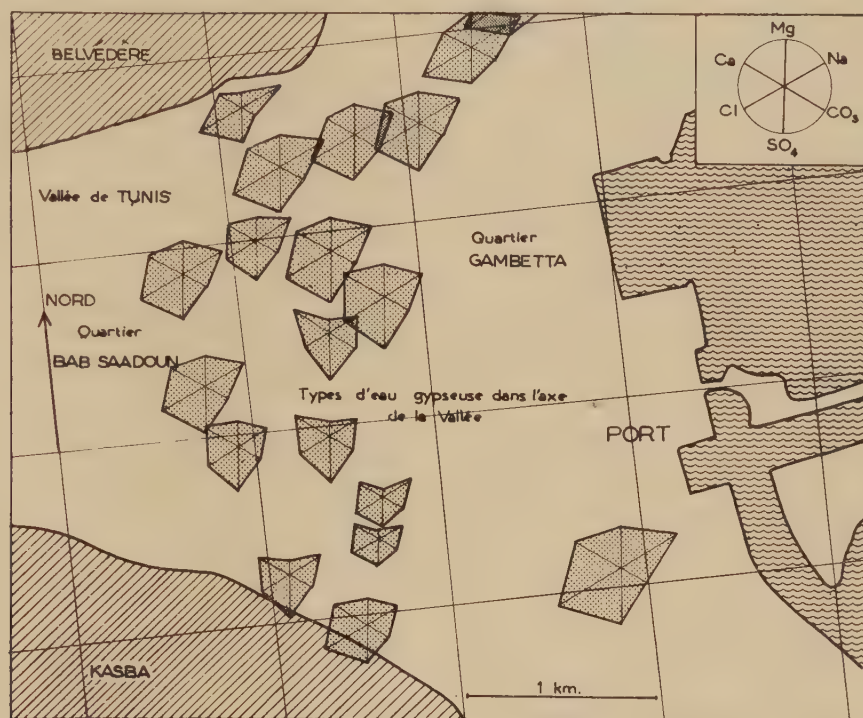


FIG. 33. — Présence de gypse dans l'ancienne vallée de Tunis.

C'est un paysage tunisien classique que l'étude des eaux souterraines permet de reconstituer en retrouvant le gypse déposé alors et maintenant enfoui sous les nouvelles alluvions descendues des collines et les constructions de Tunis.

4) La quatrième irrégularité découpe une bande de forte salure allongée dans le sens N-S à travers l'isthme de l'Ariana. Elle n'est accompagnée d'aucune variation de pente et résulte donc d'une hétérogénéité du terrain. Les équilibres ioniques y atteignent le type intermédiaire sulfo-magnésien et parfois l'extrême chlorosodique. Or, dans la région de Tunis, ceci est toujours en liaison avec l'évaporation dans les sebkas. Il s'agit par conséquent d'une sebkra fossile, desséchée maintenant et enfouie sous les alluvions fertiles qui dévalent des collines pliocènes, que l'hydrogéologie permet de reconstituer. Or, une sebkra se formant dans une région basse barrée par un verrou vers l'aval apporte un élément de la paléogéographie récente, qui sera utilisé à préciser les rejeux tectoniques subactuels.

Après avoir franchi ces quatre zones, les eaux continentales traversent pour rejoindre la mer des sebkas bordant la slikke du lac de Tunis. Comme la côte est plate, elles remontent affleurer la surface du sol. Les variations saisonnières sont faibles puisque l'équilibre est régi par le niveau

de la mer et elles ne se font sentir qu'à une certaine distance du rivage. Elles sont cependant suffisantes pour réaliser les conditions déjà définies de la sebkra : une région où la cote du terrain naturel se trouve entre les limites de variations saisonnières de la nappe. Le sol, la surface estivale et la surface hivernale des eaux se rejoignent au littoral. En hiver les sebkra peuvent être noyées, en été elles s'assèchent. Le niveau de la mer ne reste pas invariable : l'amplitude des marées dans le golfe de Tunis est d'environ 10 cm. Elles n'affectent que partiellement le lac en communication difficile avec le large. Les variations de pression barométrique peuvent également entraîner des déplacements.

Les eaux souterraines circulent et parviennent à l'ombilic. A mesure qu'elles s'en approchent, elles sont privées de leurs carbonates, puis de leurs sulfates, et finalement ne sont plus constituées que d'une solution concentrée de chlorures. Le phénomène déjà décrit pour la Sebkra Sedjoumi est bien connu ici, grâce à une étude hydrogéologique demandée en 1932 à M. Solignac à l'occasion de l'agrandissement de l'aéroport d'El Aouina. Il a fait creuser des regards et analyser une centaine de prélèvements dans les régions les plus salées évitées par les puits. Les zones isohalines épousent les courbes de niveau de la water-table. Chaque fois que la densité des renseignements augmente, la représentation des phénomènes d'hydraulique souterraine se rapproche davantage de leur aspect théorique idéal.

Les ions solubles qui forment le critère principal du terrain sont indépendants des schorres et des slikkes identifiés au début, susceptibles d'ailleurs de se dessaler. A cette notion on peut substituer maintenant celle de *sebkra bordières*, plus étendues que le *schorre* sur le rivage du lac et délimitées par les analyses d'eau.

Mais ici l'ombilic est recouvert par la mer, dont l'influence se fait sentir à une certaine distance par envahissement périodique des basses terres et diffusion ionique. R. Revelle [1941] cherche les critères opposant les eaux marines et continentales. Ici, l'opposition est claire. Comparons à celles de la lagune les eaux résiduelles recueillies en juillet sur la Sebkra Sedjoumi :

	Ca	Mg	Na	Cl	SO ⁴	CO ³	R. S.
Lac de Tunis.....	1 220 mg/l	1 026 mg/l	13 177 mg/l	23 108 mg/l	2 982 mg/l	96 mg/l	41 850 mg/l
Sebkra Sedjoumi..	2 090	929	15 870	26 270	5 356	33	51 340

Il y a deux différences déjà bien explicitées entre les eaux continentales épurées par précipitation fractionnée et la lagune maritime :

- les carbonates dont la teneur est moitié moindre à Sedjoumi que dans la mer ;
- les sulfates, deux fois moins abondants dans la lagune.

Le point de rencontre avec la mer doit être marqué par une élévation de la teneur en CO₃—. D'autre part, la présence de la mer gêne l'assèchement total des sebkra et le dépôt du chlorure de sodium qui se produit à Sedjoumi. Pour le provoquer il faut des lagunes isolées de la pleine eau (comme les marais salants) et alors le phénomène prend beaucoup plus d'ampleur.

On aperçoit qu'au ruissellement superficiel, causant l'érosion des reliefs et la sédimentation dans les bassins, s'ajoute un écoulement parallèle en profondeur, entraînant les réserves d'altitude jusque dans les parties basses en voie de colmatage où elles se sursaturent par évaporation. Les cristallisations qui se forment confèrent un caractère particulier aux sédiments apportés par les eaux de surface. Les matériaux parvenus jusqu'au lac se mélangeant à des carbonates ; ceux qui restent en régime continental se voient adjoindre des sulfates et des chlorures.

Le rivage du lac de Tunis est une frontière entre deux milieux de sédimentation que l'on n'est pas accoutumé à rencontrer en contiguité : un milieu enrichi en sels solubles qui est continental, et un milieu carbonaté qui est lagunaire et marin. S'il s'agissait de deux faciès d'un étage géologique, il pourrait être difficile de prouver l'identité de leurs âges.

SONDAGES DES ENVIRONS DE TUNIS. — Les sondages de la région de Tunis apportent des connaissances de deux ordres. D'une part ils renseignent sur la diagénèse des alluvions que l'on a vu se déposer, en même temps qu'ils démontrent encore l'importance de la sédimentation en révélant la puissance des assises formées ; d'autre part, ils ont permis de reconnaître l'estuaire de la Medjerda de l'époque manoubienne.

A la différence de la Manouba il n'y a pas eu un programme de recherche d'eau (la ville est alimentée par des conduites sous pression). Les sondages profonds sont l'exception, on en trouve quatre, dont trois exécutés par le SEREPT (Syndicat d'études et de recherches pétrolifères en



FIG. 34. — Carte des sondages profonds des environs de Tunis.

Chaque sondage est accompagné de deux chiffres, celui du numérateur étant un numéro d'ordre, celui du dénominateur indiquant la profondeur mesurée en mètres.

Tunisie). Je dois leurs coupes à l'obligeance de E. Dumon, géologue en chef de Tunis. Les autres ont généralement pour but de reconnaître des fondations ; à Tunis où la chose est délicate ils sont aussi nombreux qu'on le désire, mais peu intéressants.

Les sondages retenus figurent sur la fig. 34 avec leurs profondeurs arrondies.

SONDAGE SEREPT n° 1. — C'est un sondage de reconnaissance exécuté du 8 octobre au 10 décembre 1940 avec une Sullivan 200 (Core-Drill monté sur camion), dans le terrain délimité par l'intersection de la rue Kléber avec l'avenue Gambetta. Ce sondage, qui fait avec les deux autres l'objet d'un rapport détaillé de E. Dumon et J. Archambault, a été accompagné de déterminations concernant des minéraux et la faune ¹. Profondeur totale : 370 m.

Coupe et minéraux.

De 0 à 363 m : *Quaternaire*.

de 0 à 2 m	— terre remaniée et rapportée	= 2 m.
2 à 22	— sable fin à coquilles — Pyrite (<i>m</i>)	= 20
22 à 28	— marnes gris foncé à graviers — Pyrite (<i>m</i>)	= 6
28 à 50	— alternances de sable fin à coquilles et de marnes plastiques gris bleuté — Pyrite (<i>m</i>)	= 22

1. Les listes que nous donnons sont simplifiées. *r* = rare ; *irr* = irrégulier ; *m* = moyen ; *ab* = abondant.

50 à 74 m	— sable fin ou demi-fin avec des passées de marnes plastiques grises, bleues ou jaunâtres et de marnes sableuses — Pyrite (<i>m</i>)	= 24 m
74 à 92	— alternances de sable et de marnes plastiques bariolées, grises, rouges ou verdâtres — Pyrite (<i>m</i>), gypse (<i>m</i>)	= 18
92 à 151	— alternances de marnes bariolées grises, rouges ou verdâtres et de grès plus ou moins cimentés et rubéfiés — Pyrite (<i>m</i>), gypse (<i>r</i>) à 115 m	= 59
151 à 206	— alternances de marnes gris bleu et de grès plus ou moins cimentés, rubéfiés à petits galets — Pyrite (<i>m</i> ou <i>ab</i>)	= 55
206 à 305	— alternances marnes et grès. Marnes bariolées vertes, rouges, grises, parfois blanchâtres et marnes unicolores plastiques ou assez dures, souvent sableuses. Grès irrégulièrement cimentés avec intercalation de petits graviers — Passées avec pyrite (<i>ab</i>)	= 99
305 à 345	— grès marneux bariolés, marnes unicolores à grains de quartz et à graviers — Pyrite (<i>r</i>)	= 40
345 à 363	— sables grossiers à graviers et petits galets, marnes gréseuses chocolat	= 18

De 363 à 370 m : *Pliocène*.

Marnes grises et brunes continentales à <i>Helix</i>	= 7 m
--	-------

Macrofaune : Gastropodes (très *ab* et *ab* jusqu'à 140 m, *m* de 140 à 175 m, *r* plus bas). — Lamellibranches (très *ab* et *ab* jusqu'à 110 m, *m* de 110 à 140 m, *r* plus bas). — Oursins (*irr*). — Crustacés signalés.

Microfaune : *Miliolidae* : *Triloculina*, *Quinqueloculina*, etc... (*ab* jusqu'à 35 m, *irr* plus bas). — *Ophthalmitolidae* : *Cornuspira*, *gordiospira* (très *r*). — *Nonionidae* : *Elphidium lessonii* et cf. *lessonii* (*r* avec deux horizons *m* à 28 et 85 m). — *Leneroplidae* : *Sorites* ou *Amphisocus* (formes à test blanc *r*, formes à test bleu *m*). — *Rotaliidae* : *Rotalia*, *Eponides* (*m* jusqu'à 25 m, *r* plus bas) ; divers autres *Rotaliidae* (*ab* jusqu'à 225 m). — Ostracodes signalés.

SONDAGES SEREPT n^{os} 2 et 3. — Le n^o 2 est une reconnaissance, exécutée à Djebel Djelloud à l'W de la voie ferrée et à faible distance de l'affleurement éocène, du 11 décembre 1940 au 10 février 1941 avec la même Sullivan 200. Le n^o 3 a commencé à partir du 11 décembre 1941 à 300 m au S du précédent. Les coupes sont analogues et confondues dans l'étude de E. Dumon et J. Archambault. Il n'y a qu'une variation notée dans la cote de rencontre des calcaires éocènes, le n^o 2 les ayant rejoints à 180,75 m et le n^o 3 à 180 m. Utilisant en plus les renseignements d'un ancien ouvrage disparu des archives, Dumon et Archambault disposent de trois points qui leur permettent d'évaluer un pendage de 20° vers l'E. Profondeur totale : 192 m.

Coupe et minéraux.

De 0 à 160 m. : *Quaternaire*.

de 0 à 6 m	— sable coquillier et marnes plastiques gris bleu altérées — Pyrite (<i>ab</i>)	= 6 m
6 à 20	— marnes plastiques gris bleuté (vase) à débris de coquilles — Pyrite (<i>ab</i>)	= 14
20 à 22	— sable et marnes plastiques alternés — Pyrite (<i>ab</i>)	= 2
22 à 26,50	— marnes plastiques consolidées — Pyrite (<i>ab</i>)	= 4,50
26,50 à 58	— marnes plastiques (vase) couleur rouille bariolées ou grises à gypse avec rares intercalations de sable — Pyrite (<i>m</i>), gypse (<i>ab</i>)	= 31,50
58 à 70	— marnes plastiques gris bleu à gypse — Pyrite et gypse (<i>ab</i>)	= 12
70 à 81	— alternances de sable et de marne gris bleuté — Pyrite et gypse (très <i>ab</i>)	= 11
81 à 96	— marnes gris bleuté contenant des fragments remaniés de marne calcaires éocènes avec rares intercalations sableuses — Pyrite (très <i>ab</i>), gypse (<i>ab</i>)	= 15
96 à 160	— <i>id.</i> , mais avec très rares intercalations sableuses — Pyrite (très <i>ab</i>), gypse (<i>m</i>)	= 64

De 160 à 168 m. : *Auvervien*.

Marnes schisteuses gris bleu — Pyrite (<i>ab</i>)	= 8 m
---	-------

De 168 à 192 m : *Éocène*.

de 168	à 185,75 m	— alternances de marnes gris bleu avec remplissage de calcite blanche et de marnocalcaires gris passant à la base à un calcaire marneux — Pyrite (m)	= 17,75 m
185,75	à 192	— calcaire compact fissuré	= 6,25

Macrofaune : dans le Quaternaire seulement. Débris de tests de Lamellibranches, plus rarement de Gastropodes, Crustacés, Oursins, Dentales, Coraux, etc... (très *ab* de 0 à 25 m, *ab* de 40 à 160 m).

Microfaune : elle comprend d'une part des espèces quaternaires et d'autre part des espèces éocènes que l'on trouve *in situ* et remaniées dans le Quaternaire jusqu'à des cotes assez élevées.

Espèces quaternaires : *Miliolidae* (*ab* jusqu'à 60 m, *irr* plus bas). — *Nonionidae* : *Elphidium* (*m* jusqu'à 25 m, *irr* plus bas). — *Rotaliidae* : *Rotalia cf. beccarii* (*ab* jusqu'à 20 m, *irr* plus bas). — Ostracodes (*r*).

Espèces éocènes : pour les formes remaniées dans le Quaternaire les cotes sont données de bas en haut, dans le sens du déplacement.

	<i>in situ</i>	remaniées
<i>Amnodiscidae</i> : <i>Amnodiscus</i>		160 à 140 m (<i>r</i>)
<i>Lituolidae</i> : <i>Cyclamina</i> , <i>Haplophragmoides</i>	160 à 165 m (<i>r</i>)	160 à 100 (<i>m</i>)
<i>Textulariidae</i> : <i>Textularia</i>	160 à 185 (<i>m</i> , <i>r</i>)	160 à 90 (<i>m</i>)
<i>Miliolidae</i>	160 à 175 (<i>r</i>)	160 à 140 (<i>ab</i>)
<i>Lagenidae</i> : <i>Robulus</i>	160 à 185 (<i>m</i> , <i>irr</i>)	160 à 140 (<i>m</i>)
		140 à 50 (<i>irr</i>)
	<i>Nodosaria dentalina</i>	175 à 185 (<i>m</i>)
<i>Buliminidae</i> : <i>Uvigerina</i>	160 à 180 (<i>m</i>)	160 à 75 (<i>r</i> , <i>irr</i>)
<i>Rotaliidae</i> : formes rosacées, <i>Valvulinaria</i>		160 à 70 (<i>ab</i> , <i>m</i>)
	<i>Eponiides</i>	70 à 30 (<i>m</i> , <i>irr</i>)
	<i>Epistomaria</i>	160 à 90 (<i>m</i>)
		170 à 175 (<i>r</i>)
		170 à 183 (<i>r</i>)
<i>Globigeriniidae</i> : <i>Globigerina</i>	160 à 180 (<i>ab</i>)	160 à 30 (très <i>ab</i>)
	180 à 188 (très <i>ab</i>)	
Ostracodes :	180 à 185 (<i>r</i>)	

SONDAGE n° 6140 B. I. R. H. « DE L'EXPOSITION ». — En novembre et décembre 1947 la ville de Tunis a organisé une exposition qui s'est tenue au Belvédère, au N de Cité-Jardin, c'est-à-dire à proximité de ce que nous avons appelé au paragraphe des eaux souterraines, la Sebkra du Borgel. A cette occasion, la Direction des travaux publics, qui inaugurerait un ambitieux programme de recherches d'eau, a décidé de montrer au public un rotary en fonctionnement avec injection, circulation de la boue, etc... Le choix s'est porté sur un petit Core-Drill, Failing 1500. Le 5 janvier 1948, à la fermeture de l'exposition, la démonstration achevée, il avait fait un trou de 213 m de profondeur.

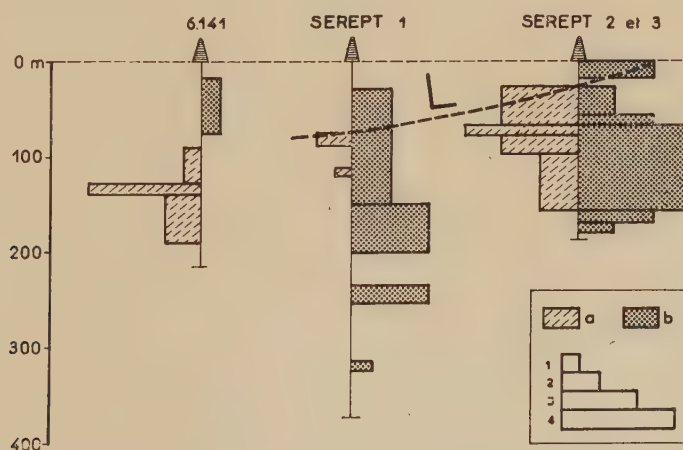


FIG. 35. — Pyrite et gypse secondaires dans les sondages autour de la lagune de Tunis.

a : gypse ; b : pyrites (1, en quantité rare ; 2, moyenne ; 3, abondante ; 4, très abondante). L : limite supérieure d'oxydation des vases.

Après démontage des stands, on a profité du trou pour essayer les horizons aquifères à la soupape, et en février et mars on a établi un puits captant la tranche d'eau supérieure au bénéfice du « Tennis-Club ».

La coupe est celle que j'ai relevée aux « cuttings ».

De 1 à 85 m : *Quaternaire lagunaire*.

de	0	à	1	m	— limon ou terre végétale	=	1	m
	1	à	2,80		— sable avec débris de coquilles	=	1,80	
	2,80	à	6,80		— argile sableuse jaune	=	4	
	6,80	à	8		— grès tendre	=	1,20	
	8	à	10		— argile sableuse un peu gypseuse	=	2	
	10	à	10,80		— grès	=	0,80	
	10,80	à	15		— argile plastique bleutée (vases) avec passées d'argile	=	4,20	
	15	à	15,40		— grès ligniteux	=	0,40	
	15,40	à	34,50		— argile compacte bleutée (ancienne vase), parfois un peu ligniteuse, rarement de la pyrite	=	19,10	
	34,50	à	35		— grès dur ligniteux	=	0,50	
	35	à	44		— ancienne vase identique	=	9	
	44	à	50		— argile très ligniteuse sableuse	=	6	
	50	à	75		— ancienne vase identique	=	25	
	75	à	84		— argile dure bleue avec de petites intercalations de grès durs jaunes à grain très fin, un peu de pyrite	=	9	
	84	à	85		— grès dur jaune à grain très fin	=	1	

De 85 à 213 m : *Quaternaire continental*.

de	85	à	90	m	— argile plastique dure	=	5	m
	90	à	136,50		— argile plastique brunâtre, parfois un peu gypseuse avec quelques passées sableuses ou gréseuses. De 129 à 129,50 m gypse pulvérulent et de 131 à 131,50 m gypse cristallisé	=	46,50	
	136,50	à	139		— grès glauconieux alternant avec des bancs de gypse cristallin	=	2,50	
	139	à	139,50		— gypse pulvérulent	=	0,50	
	139,50	à	171		— argile plastique brunâtre plus gypseuse avec quelques passées sableuses ou gréseuses. De 145 à 169 m, passées de gypse blanchâtre	=	31,50	
	171	à	189		— argile grisâtre terreuse et sableuse alternant avec de l'argile rougeâtre, des passées gréseuses et des passées gypseuses	=	18	
	189	à	190,50		— grès bleuté dur à grain fin très fissuré	=	1,50	
	190,50	à	201		— argile grise ou brune emballant des rognons d'argile plastique rouge	=	10,50	
	201	à	202		— grès rougeâtre sableux emballant des rognons d'argile bleue	=	1	
	202	à	208		— grès gris dur plus grossiers	=	6	
	208	à	213		— argile brune plastique emballant des rognons d'argile dure et plus rouge	=	5	

A la date du sondage, ce travail n'était pas entrepris et je n'ai pas conservé d'échantillons pour les soumettre à des déterminations pétrographiques. Ils sont irremplaçables.

SONDAGE N° 5601 B. I. R. H. — Sondage privé exécuté à la Soukra dans la propriété Bokhobza de février à avril 1947 par la S. I. F. Se distingue par sa profondeur = 114 m.

de	0	à	8	m	— sable	=	8	m
	8	à	14		— sable et bancs de grès	=	6	
	14	à	18		— sable gris marneux	=	4	
	18	à	23		— marne grise	=	5	
	23	à	25		— sable gris contenant l'eau exploitable	=	2	
	25	à	27		— sable marneux	=	2	
	27	à	32		— marne grise sableuse	=	5	
	32	à	40		— marne grise et coquilles	=	8	

40	à 61 m	— marne	= 21 m
61	à 99	— marne grise et coquilles	= 38
99	à 104	— marne grise	= 5
104	à 108	— marne grise	= 4
108	à 114	— marne grise	= 6

Les sables et grès supérieurs sont ceux de la dune de la Soukra.

SONDAGES DE L'AÉROPORT DE KHEREDINE. — Nous avons évoqué ces travaux datant de 1932 à propos de la water-table. Certains sondages ont rencontré une faunule quaternaire étudiée par P. Bédé [1948] ; G. Castany [1949] en fait état.

Il y a confusions dans les sondages ; les coordonnées sont négligées, ignorées je crois de l'auteur. Celui-ci a déterminé 94 espèces, il y a 66 formes communes avec celles vivant actuellement dans le golfe et 25 seulement avec l'ancienne lagune de Tunis de Pallary. Il pense qu'elles vivaient dans un milieu salé, sous une faible épaisseur d'eau et que la profondeur de 30 m à laquelle on les a récoltées résulte d'un mouvement négatif du sol.

LES SONDAGES DU PORT DE TUNIS-GOULETTE. — Ils ont été forés en 1930 au nombre de 20 à 25, tout au long des berges du canal. Ils découvrent un fait intéressant : une croûte enfouie sous les vases à 5 ou 10 m de profondeur dans le prolongement de l'île Chekli.

RECONNAISSANCES DES FONDATIONS DE LA VILLE DE TUNIS. — De très nombreux ouvrages montrent que le sous-sol est formé de vases encore élastiques jusqu'à 20 ou 40 m de profondeur. Dans son traité A. Meyer [1939] étudie un exemple.

TRANSPORT DES SELS DISSOUS ET PEROXYDATION DES MATIÈRES ORGANIQUES ET DU FER RÉDUIT DANS LA ZONE DE SATURATION. — Seul le sondage 6140 effectué sous les auspices des services des Travaux publics a servi à la prospection hydraulique. Il apporte une coupe verticale haute de 200 m. Les tranches de terrains retenues après examen du carottage électrique et des cuttings ont été isolées de bas en haut par des bouchons de ciment, et essayées successivement à la soupape.

Les résultats de ces essais du sondage de reconnaissance de l'Exposition sont les suivants :

Cotes	Niveau statique	Débit	Abaissement	Température
15 à 21 m	8,5 m	0,6 l/sec.	1,2 m	20°5
40 à 60	9,9	0,6	5,5	22°5
83 à 86	5,6	0,5	16	22°5
187 à 208	18,4	0,28	11	22°5 dégagement de CO ₂

Les débits sont faibles, les capacités spécifiques dérisoires, ce qui ôte toute importance aux variations du niveau statique. Les mesures de température sont douteuses.

COTES	Ca	Mg	Na	Cl	SO ₄	CO ₃	pH	DH	R. S.
14 à 17 m	555 mg/l	864 mg/l	1 357 mg/l	2 769 mg/l	1 030 mg/l	225 mg/l	7,9	242	6 234 mg/l
40 à 60				7 899					15 790
83 à 86	777	788	5 347	9 674	1 864	774	6,8	506	19 200
187 à 208	1 035	652	3 565	6 213	2 164	1 225	7,1	514	14 974

TABL. 13. — Analyses chimiques du sondage de l'Exposition.

Les cotes du captage établi diffèrent un peu de celles des essais préalables de reconnaissance.

Les zones gypseuses et chlorosodiques sont étagées comme à Sedjoumi. De 187 à 208 m, on est dans la zone de précipitation du gypse ; en calculant la teneur en SO₄ par le procédé graphique

de Berkaloïff, on trouve une solution saturée. De 83 à 86 m, c'est la zone chlorosodique ; les teneurs en Na^{++} et en Cl^- croissent, le Ca^{++} et le SO_4^{--} diminuent, éliminés plus haut par cristallisation.

La zone lessivée carbonatée n'a pas été atteinte, du reste elle n'existe vraisemblablement plus, terminée en biseau, coincée entre les zones salées supérieures en équilibre ionique avec la mer et les régions surconcentrées des grandes profondeurs (voir le schéma fig. 36).

Les nouvelles méthodes de recherches précisent, en profondeur aussi bien qu'à la surface des alluvions, l'importance des transports des sels solubles. Elles définissent un faciès continental caractérisé par le gypse. Sous une lagune marine comme celle de Tunis ce faciès est beaucoup plus épais que le faciès lagunaire carbonaté superficiel.

Mais l'apport terrigène ne se limite pas aux sels solubles. Dans le milieu lagunaire anaérobie et fortement réducteur, les venues d'eaux continentales amènent de l'oxygène dissous, auquel peut s'ajouter une fraction nouvelle libérée par la réduction de leurs sulfates. Le premier effet consiste en l'oxydation des matières organiques avec dégagement de gaz carbonique. La teneur en CO_2 augmente entre 83 et 86 m ; exceptionnellement elle dépasse 1 200 mg/l entre 187 et 208 m. Le pH acide suppose en même temps une forte proportion de CO_2 dissous, qui est à rapprocher du dégagement de CO_2 observé.

A Tunis, sur la route de l'Ariana, en face de l'École d'agriculture, deux petits sondages ont été exécutés en 1951 pour reconnaître les fondations d'un immeuble. Ils étaient implantés sur les pentes du Belvédère (Mioquaternaire fluvatile masqué par des éboulis de pente) à environ 20 m d'altitude.

L'un et l'autre ont livré passage à un violent dégagement de gaz carbonique, accompagné de projections de gravillons et de nodules de pyrite. Un peu d'eau entraînée et pulvérisée en fines gouttelettes rendait le jet visible de loin. La force était telle que le fût de 200 l que l'on avait renversé sur le trou pour tenter de protéger l'appareil a eu son fond crevé. La poche de gaz comprimé a débité avec une force décroissante pendant environ 48 heures. Le phénomène semble être lié au voisinage des éboulis du Belvédère et de la Sebkra du Borgel. Les eaux de ruissellement, qui circulent à travers les éboulis, atteignent le schorre du Borgel, qui est un milieu réducteur rempli de matières organiques. L'oxygène dissous dans ces eaux les attaquera avec un certain dégagement de CO_2 ; toutefois l'oxydation, ayant lieu sans augmentation de volume, ne pourrait produire du CO_2 sous pression. Les pressions élevées résultent sans doute de la fraction d'oxygène supplémentaire libérée par la réduction des sulfates. La pyrite accompagnant les substances organiques, les nodules remontés prouvent bien que les eaux qui jaillissent ont rencontré ces sédiments particuliers, elles les ont arrachés en léchant les parois étanches.

Le CO_2 se dissout à l'état d'ions CO_3^{--} . En profondeur les pressions augmentent la solubilité, les sondages ont pu crever un écran argileux et amener à la pression atmosphérique les eaux saturées en CO_3^{--} emprisonnées dessous. D'ailleurs l'augmentation parallèle des températures produit l'effet contraire ; un rapide mouvement ascensionnel fera décroître la pression plus vite que la température et favorisera le dégagement. En corrélation on peut remarquer la haute teneur en CO_3^{--} , atteignant 375 mg/l dans les puits alentours.

Pour revenir à la question de la synthèse des hydrocarbures, si la surface supérieure d'une couche sédimentaire, considérée comme un éventuel milieu de genèse, peut en de nombreux cas se trouver dans des conditions d'anaérobiose, ce milieu risque de se voir rapidement réoxygéné en profondeur par l'action des écoulements d'eaux souterraines. Bien que non aperçue jusqu'à présent, c'est certainement une des principales difficultés qui s'oppose à la reconstitution paléogéographique d'un bassin dans lequel auraient pu s'élaborer ces hydrocarbures. Leur formation aurait nécessité des lagunes maritimes particulièrement vastes dans lesquelles les régions centrales se seraient vues soustraites aux actions continentales, mais elle paraît contrariée dans un petit bassin paralique.

Les influences terrestres ne se limitent pas seulement à la combustion des matières organiques, il y a également peroxydation du fer réduit des vases. L'oxydation du gel ferreux qui disparaît, progressivement remplacé par des oxydes de fer, s'observe dans les coupes des sondages du SEREPT avec l'apparition de vases bariolées de rouge. Au n° 1 le phénomène débute très progressivement, on note des variations de couleur à partir de 50 m, à partir de 75 m on découvre le rouge avec les « marnes plastiques bariolées » de J. Archambault et E. Dumon. Le milieu vaseux anaérobie et réducteur est traversé. Au n° 2 le régime oxydant s'établit plus brutalement à partir de 26 m. A proximité des collines calcaires, les circulations des eaux souterraines sont sans doute plus actives. Les deux résultantes des circulations d'eau sont apparues dans chaque sondage à la même cote, à une précision supérieure au mètre.

SEREPT, n° 2 : à 26,50 m apparition de la couleur rouge et du gypse,

SEREPT, n° 1 : à 74,50 m apparition de la couleur rouge et du gypse.

Grâce à ces observations on peut continuer à suivre la progression des eaux souterraines jusqu'au rivage et même à travers des terres déjà pratiquement immergées.

Plus bas, après cette double attaque du fer et des matières organiques, il n'y a plus de vases, les argiles sont libérées. Elles conservent la teinte bleue de leur milieu de dépôt, qui ne les quittera sans doute jamais et rappelle de nombreux faciès d'étages anciens, mais elles deviennent de plus en plus dures.

FACIÈS MARINS ET CONTINENTAUX. — L'application à la géologie des techniques de l'hydraulique souterraine va permettre de compléter et de résumer l'opposition entre sédiments terrestres et marins, plusieurs fois déjà évoquée. Les argiles et les sables forment le matériau de base commun. La granulométrie devrait permettre de distinguer les sables remaniés par la mer, mais dans le cas de ces sondages elle n'a pu être faite.

Les apports marins sont calcaires et pyriteux. M. M. Iermolaïev [1948] étudie en laboratoire dans des tubes d'Ekman des vases prélevées au N de la mer de Kara, et admet que les oxydations et réductions qu'il y observe résultent d'actions bactériennes, car l'introduction d'un antiseptique les arrête. Comme le carbonate de calcium en solution se dépose dans les parties réductrices plus basiques, cela assure encore le faciès essentiellement carbonaté des lagunes qui sont le siège d'une vie bactérienne intensive. Les sondages dans les vases du lac de Tunis traversent des horizons durcis ; ces derniers n'impliquent pas un début de lithogénèse calcaire, car au contraire d'après Iermolaïev, qui trouve aussi des lits indurés, le calcium est deux fois plus concentré dans les parties plastiques ; l'induration commençante pourrait alors être due plutôt à des variations de la teneur en eau.

Le calcaire se remarque davantage associé aux sables. Il contribue à durcir les grès des trois sondages ; à celui de l'Exposition n° 6140, à partir de 85 m où on pénètre dans les séries continentales, c'est-à-dire pauvres en calcaires, on retrouve du sable. Les enrichissements en calcaires des sondages du canal sont souvent au toit des sables. Rappelons les prélèvements de surface n°s 14 et 17 à un moindre égard, à la fois calcaires et sableux. La prépondérance dans le mélange du calcaire et du sable tend à faire des mollasses. Avec la sédimentation pliocène on précisera la genèse en milieu lagunaire des mollasses de Porto Farina.

La pyrite s'avère très abondante dans les sondages du SEREPT qui explorent les vases du lac, tandis qu'il n'y en avait qu'à peine dans le n° 6341 en bordure de la lagune (fig. 35). Des nodules de pyrite ont jailli par ailleurs, entraînés avec le dégagement de gaz carbonique dans les deux petits sondages en dessous de Mutuelleville. Les cristallisations de pyrite sont très abondantes dans les fissurations de l'Éocène qui ont dû être remplies par le gel ferrique réducteur.

Le milieu continental se distingue par le gypse, comme cela a été dit, et aussi par du lignite.

Le gypse, formation secondaire terrigène, est plus abondant dans le sondage de bordure 6141 que dans les sondages plus centraux du SEREPT ; dans ceux-ci, il est mieux représenté au n° 2, où l'oxydation commence plus haut, là où la proximité des calcaires suppose une circulation liquide facile (fig. 35). Le sondage 6140 rencontre quelques mètres de vase, puis des argiles bleues compactes, durcies après 75 m. Il s'y ajoute du lignite. Il est resté jusque là dans une sebkra de bordure analogue à celle du Borgel actuelle, un schorre ou une slikke, recouvert de Végétaux halophiles.

En résumé, la sédimentation terrestre se caractérise par la présence des ions solubles (le calcaire ne formant que des croûtes minces ou de petits nodules isolés), par une faunule d'animaux terrestres ou d'eau douce ou tout à fait exceptionnellement des gisements de Vertébrés, par du lignite. La sédimentation marine ou plutôt lagunaire se caractérise par sa faune, par du calcaire épais, par de la dolomie, par de la pyrite. Une complication résulte du fait que les ions solubles imprègnent secondairement les séries marines.

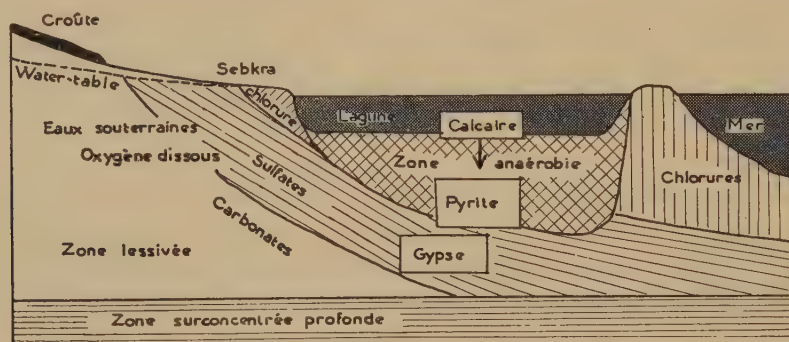


FIG. 36. — Schéma des faciès marins et continentaux.

Un schéma assemble les observations (fig. 36) et situe la lagune de Tunis dans l'ensemble du paysage. Il illustre ce qui a été dit précédemment, tenant compte en particulier des observations faites au cours de l'étude de la water-table, et dispense de nouveaux commentaires.

Pour achever, insistons une dernière fois sur une notion encore peu répandue ou confuse. Ces recherches entreprises avec des méthodes inhabituelles font apparaître le gypse comme un résidu de la concentration des eaux souterraines, tout au moins dans le cadre de leur champ d'application. J. Bourcart et J. Ricour [1952 *a* et *b*] entre autres s'efforcent d'imaginer une genèse marine ou lagunaire peu convaincante, où le soufre des sulfates viendrait de l'oxydation des pyrites. Ici il se produit plutôt le phénomène inverse, puisque les sulfates sont réduits au contact des matières organiques avec dégagement de CO_2 .

PASSAGES LATÉRAUX AUX FACIÈS GYPSEUX. — On peut se livrer maintenant à une démarche inverse de celle que tente généralement le géologue. Celui-ci, après avoir observé les affleurements, passe à une reconstitution paléogéographique ; au contraire à la suite de l'étude de l'évolution géographique actuelle, on essaiera d'éclairer l'aspect géologique après diagénèse.

Un des caractères saillants de ce paysage lagunaire, c'est de juxtaposer des faciès très différents. Le gypse des sebkra arrive au contact des calcaires de la lagune. L'exemple le plus classique des passages de faciès, le premier découvert et celui des manuels, consiste précisément en un passage du calcaire au gypse : dans le Ludien du bassin de Paris, le gypse de Montmartre et de la carrière Lambert est contemporain du calcaire lacustre de Champigny. L'accumulation de

gypse pourrait provenir de résidus solubles laissés sur un rivage palustre en subsidence comme celui de la lagune de Tunis, autour d'un lac calcaire trop profond pour que l'évaporation ait pu concentrer ses eaux.

Mais, si l'on peut chercher une confrontation sur un point précis entre le paysage actuel de Tunis et l'Éocène, les sédiments de notre région s'écartent beaucoup de ceux du bassin parisien.

R. A. Sonder [1946] donne un tableau de l'alluvionnement et de la sédimentation en relation avec le mouvement des eaux qu'utilise G. Millot [1949]. Les calcaires ou les sels se formeraient en période de dénudation, état qui aurait donc été celui de Paris au Ludien. Tunis traverse la période d'érosion ; en lui appliquant les distinctions de Sonder, la région se caractérise par un relief modéré, un mouvement des eaux de vitesse modérée et un transport par suspension. Les roches essentielles formées sont celles prévues par Sonder ; des argiles et des marnes, les sels si intéressants par ailleurs, restant un peu secondaires du côté du volume.

V. M. Goldschmidt [1945] décrit les périodes géologiques comme des cycles sédimentaires successifs, formant chacun une gigantesque analyse fractionnée. Il résume les phases dans une liste théorique que reprend également G. Millot.

- 1) résidus insolubles : sable et grès avec quartz et zircon
- 2) hydrolysats : argiles et shales
- 3) oxydats : oxydes de fer sédimentaires
- 4) réducteurs : charbons, schistes bitumineux, sulfures
- 5) carbonates
- 6) résidus d'évaporation : chlorures, sulfates, borates.

C'est un fractionnement rappelant le nôtre, mais qui se dispose dans le temps au lieu de s'étaier dans l'espace et d'une autre ampleur.

Au cours du Pliocène, la région de Tunis était dans la première phase, celle des grès et des sables. Actuellement, elle atteint le deuxième état, la proportion des sables est faible par rapport aux argiles. La présence du lac et des sebkra permet une incursion dans les quatrième, cinquième et sixième phases. On peut donc rapprocher du Keuper. Celui-ci réunit, emmêlés par le gonflement et la poussée des sels, des argiles prédominantes, des calcaires siliceux sombres, de la dolomie, de la pyrite et du gypse. Mais il est plus élevé dans la série de Goldschmidt, les fossiles marins ont complètement disparu et les ions solubles deviennent surabondants. Pour le Keuper des Vosges, G. Minoux et J. Ricour signalent des *Myophoria* et des *Avicula* dans la « dolomie-moellon » [1946].

En ce qui concerne proprement le lac de Tunis, s'il fallait chercher un faciès analogue dans les ères sédimentaires, on pourrait trouver certaines séries dans le Jurassique, et particulièrement dans le Jurassique nord-africain : marno-calcaires sombres et argiles bariolées, grès existant mais transformés en quartzites, sédiments souvent fortement dolomités, faunes pyriteuses.

ASPECT DE L'ESTUAIRE DE LA PÉRIODE MANOUBIENNE. — En résumé, les régions centrales de la lagune paraissent devoir évoluer vers les marno-calcaires pyriteux et dolomitiques renfermant du gypse, la périphérie vers des mollasses. Cette diagénèse se surajoute aux transports allogènes dans l'estuaire de la Medjerda manoubienne. L'alluvionnement dans l'estuaire s'est accompagné d'une subsidence. La puissance des assises atteint 360 m dans l'axe du fleuve. Quoique inférieure aux 600 m de limon sédimenté en régime continental à l'abri de la Barrière de Tunis, elle ne suppose pas un plus faible volume d'apport, car le dépôt est plus dispersé.

La coupe des trois grands sondages montre un alluvionnement, qui dans l'ensemble est plus grossier dans l'axe du fleuve (fig. 37). C'est une nouvelle preuve du passage de la Medjerda « ma-

noubienne ». En milieu marin le triage est plus poussé qu'en bassin endoréique, les fractions fines transportées latéralement devaient se sédimenter dans des vasières. L'estuaire se frayait proba-

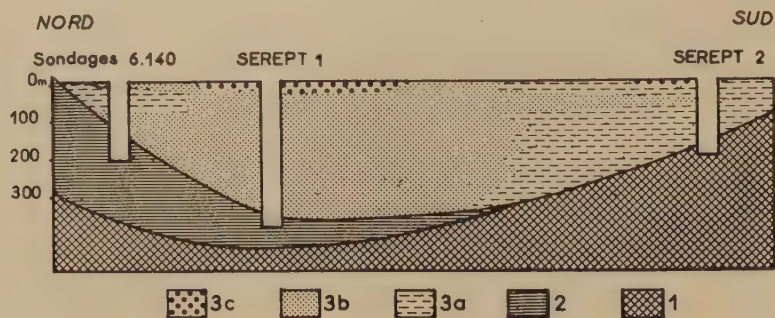


FIG. 37. — Schéma de la subsidence « manoubienne » dans l'ancien estuaire de la Medjerda.

1 : Crétacé ou Éocène ; 2 : Mio-Quaternaire fluviatile ; 3 : sédimentation manoubienne (a : argileuse ; b : sablo-argileuse ; c : sableuse).

blement un passage dans ce fond de golfe encombré de vase et de lagons. Si bien qu'en intéressant l'ensemble de la subsidence, c'est plutôt l'axe estuarien qui prendra un aspect mollassique, tous ces faciès étant avant tout lenticulaires.

CHAPITRE IV

LE DELTA DE LA MEDJERDA AU PLIOCÈNE

Les faciès du Pliocène marin (description lithologique, contribution de la paléoécologie à la détermination de la lithogénèse). — Pliocène lagunaire de Gammart. — Pliocène fluviatile. — Paléogéographie du delta.

J'ai essayé d'appliquer au Pliocène les notions dégagées de l'étude des phénomènes actuels, tout en tenant compte et plus qu'on ne le fait habituellement de la paléoécologie, pour laquelle M. J. Roger m'a guidé. Je me suis ainsi attaché à définir avec le maximum de précision les faciès ou plutôt la « Flachseebeobachtung » des auteurs allemands. Comme au Quaternaire, la sédimentation de la Medjerda joue un rôle prédominant, d'où le titre de ce chapitre.

I. Les faciès du Pliocène marin.

En 1887, G. Le Mesle [1888] reconnaissait le Pliocène marin du Nord de la Tunisie. Sur la carte géologique provisoire de la Tunisie au 800 000^e de 1892, F. Aubert attribua au Pliocène les affleurements de Porto Farina. Mais M. Solignac [1927], Ch. Depéret et M. Solignac [1931] et V. Stchepinsky [1938] y récoltaient des faunes qui auraient rassemblé un mélange d'espèces miocènes et pliocènes, et voulaient par conséquent y voir l'étage « Sahélien » de transition de Pomel, qui avait d'ailleurs été créé pour des raisons tectoniques, du temps où l'on niait les plissements pliocènes. R. Laffitte [1948] s'est attaqué au Sahélien et a démontré son inexistence en Algérie. En même temps, avec Dumon [1948], il rapportait au Pliocène supérieur, faciès plaisancien, un des affleurements du Sahélien de Tunisie, celui de l'Ichkeul, au-dessus duquel C. Arambourg devait décrire une faune de Vertébrés villafranchienne [Arambourg, 1949 ; Arambourg et Arnould, 1949]. P. F. Burollet [1951] effectue une « Étude géologique des bassins mio-pliocènes du NE de la Tunisie », M. Arnould [1952] lui détermine les faunes, ils achèvent la liquidation du Sahélien au bénéfice du Pliocène. G. Castany [1952 b] a repris leurs conclusions, c'est en tant que Pliocène que les affleurements furent signalés dans le livret-guide et montrés aux congressistes du XIX^e Congrès géologique international. Mais en 1952 également, Stchepinsky soutient la controverse dans le *Compte rendu sommaire* de la Société géologique en expliquant brièvement ce qu'il a entendu par « cycle sahélien » : alors qu'au Tortonien la profondeur diminue, il se marque par un approfondissement suivi d'une régression avec des grès à Balanes et des épisodes vaseux à grandes Huîtres, et s'achève par des grès continentaux à *Helix*. Il s'agit en la circonstance du cycle pliocène. Laffitte [1952] rétorque immédiatement dans un des fascicules suivants.

Aujourd'hui l'appartenance au Pliocène ne souffre plus la discussion, mais il est dommage que la nécessité de définir sans équivoque l'étage n'ait pas permis jusqu'à présent de s'inquiéter du faciès. Et à ce point de vue il est compréhensible que des stratigraphes expérimentés comme Solignac et Stchepinsky aient voulu distinguer la région de Bizerte de ce qu'ils connaissaient au

cap Bon, où Allemand-Martin [1909, 1923] avait déterminé le Pliocène. La région de Bizerte surprend dès l'abord par la puissance des assises et la dureté des bancs de grès cimentés, mais un examen plus détaillé montre que si certaines coupes se singularisent, elles passent à des séries pliocènes normales, la rapidité et l'importance des variations latérales étant caractéristiques ; si bien que le cycle de Stchepinsky, s'il s'avère exact en des endroits favorisés, est loin de rendre compte de la complexité de la paléogéographie dans ses détails. L'âge pliocène étant maintenant reconnu, cette nouvelle étude s'attachera surtout aux variations de faciès et se propose d'établir les causes de l'extraordinaire hétérogénéité de la sédimentation.

DESCRIPTION LITHOLOGIQUE. — Le Pliocène marin de Bizerte forme le promontoire du cap Farina autour duquel se sont entassées les alluvions de la Medjerda, et se prolonge vers l'E en ceinturant le Miocène des collines du Kechabta. La ligne de falaises barrant la plaine est traversée successivement d'E en W, à la faveur de ravins, par les routes de Raf-Raf, d'El Alia et de Bizerte. Ce massif principal est accompagné de quelques petits pointements : butte de Galaat Andleuss, plage du Rmel, rive nord du lac de Bizerte et de la Garaet Ichkeul, île Pilau et île Plane.

Ce Pliocène comprend deux termes successifs, des argiles bleues à la base, suivies d'un complexe d'argiles avec intercalations sablo-gréseuses de plus en plus importantes vers le sommet. Dans sa monographie, P. F. Burollet [1951] évite avec raison les appellations « Plaisancien » et « Astien » qui ne désignent que des faciès. Les argiles inférieures ou argiles de Raf-Raf de Burollet, débutent par une transgression prononcée sur le Pontien de Raf-Raf, accompagnée de galets et de conglomérats. Elles sont recouvertes d'alluvions et n'apparaissent qu'à la faveur de quelques ravinelements. Elles sont généralement homogènes. On en trouvera une description détaillée dans Burollet. Les épaisseurs que leur attribue cet auteur sont peut-être exagérées, toutefois leur limite supérieure est imprécise. Je la définis par l'apparition des intercalations sableuses, mais les premières (qui ne sont jamais cimentées) n'affleurent que sous les falaises formées par les grès supérieurs qui les recouvrent d'éboulis. Pour cette raison, au cours d'une étude hydrogéologique menée en 1950 dans la région, j'avais divisé dans mon rapport le Pliocène en trois termes, en distinguant un intermédiaire argilo-sableux plastique sous les grès. Des petits sondages de recherche d'eau l'avaient exploré vers les sources alimentant Porto Farina.

Le domaine des variations de faciès commence avec les grands affleurements sablogréseux, qui marquent la régression pliocène. On distingue trois unités : la mollasse de Porto Farina, une bordure à sédimentation lacuneuse, le bassin de Kechabta.

MOLLASSE DE PORTO FARINA. — C'est un ensemble où dominant des grès à ciment calcaire, localisé aux falaises redressées et ravinées depuis le cap Farina jusqu'à 14 km vers l'intérieur. Elles forment le Djebel Demina au cap, le Djebel Nador ensuite, un « nador » est un signal ou cairn construit au point culminant. Le détail lithologique figure sur les coupes 1, 2 et 3 de la fig. 38.

Malgré un aspect général compact, les bancs sablo-gréseux sont irrégulièrement cimentés. Des poches sableuses bien circonscrites donnent naissance à des grottes ou à des fissurations, dont les orifices rappellent parfois ceux des calcaires karstiques, mais qui restent sans profondeur, immédiatement obstruées par le sable éboulé. Autour de Porto Farina, des troglodytes, d'ailleurs semi-nomades, habitent à une trentaine de mètres d'altitude des excavations sèches regardant sur la lagune. La toponymie arabe réserve à la localité au vocable italien de Porto Farina une appellation plus évocatrice : Rhar Melah ou grottes du sel. Le sel qu'on emmagasinait là était récolté au bord de la lagune, au fond d'anciens marais salants dont il n'y a plus trace. A l'extrémité du cap, Sidi el Hadj Emmbarek est une grotte élevée et profonde, consacrée à un saint homme. Un curieux bâtiment en forme de tour la ferme en en dissimulant l'entrée. C'est un lieu de pèlerinage.

Certains bancs, très durs dans toute leur épaisseur, sont des grès calcaires cimentés pendant la diagénèse,

dont la phase carbonatée semble d'origine biologique, les restes d'organisme y étant abondants. Il s'y ajoute parfois des encroûtements d'Algues calcaires. Mais généralement la roche a émergé à l'état de sable durci avant la diagenèse complète. Le calcaire a migré avec la circulation des eaux souterraines chargées en CO_2

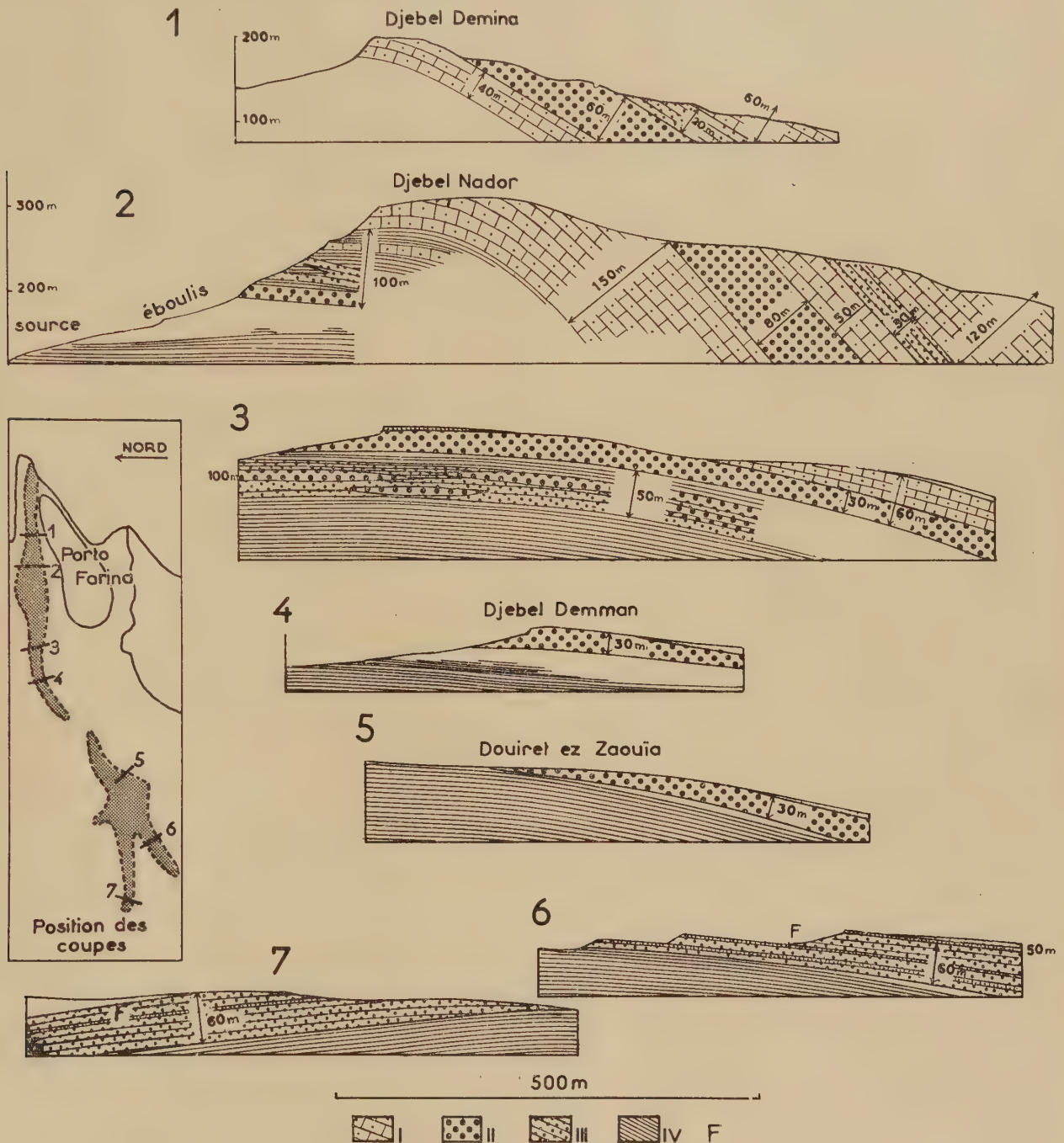


FIG. 38. — Coupes sériees du Pliocène supérieur.

I : mollasse ; II : sable meuble ou légèrement gréseux ; III : argile sableuse ; IV : argile bleue ; F : accumulation fossilifère.

et les barres sont simplement recouvertes d'une cuticule qui n'est pas autre chose qu'une véritable croûte laissée par l'évaporation. Dans le ravin de l'Oued Bou Rezem les stratifications sont marquées par des alignements de rognons de tuf pointant vers l'extérieur. Ceux-ci sont formés par les eaux souterraines qui circulent dans la pente, quand elles suintent pour ruisseler dans le lit de l'oued. Le sémaphore du Djebel Nador est assis

sur des grès qui semblent massifs, mais qui sont en réalité si peu cohérents que l'on a pu creuser à proximité des écuries souterraines en taillant les parois dans un sable durci.

Les intercalations argileuses sont importantes mais englobent des fragments de grès zoogènes roulés. L'argile a pu sédimenter par excès de charge dans des tranches d'eau à turbulence faible au voisinage de courants capables de transporter des galets arrachés à des falaises émergées déjà consolidées. Les formes lenticulaires des argiles et des sables prouvent d'ailleurs la coexistence des courants avec des zones protégées ou plus profondes.

L'épaisseur de la mollasse varie brutalement. Burollet dessine un schéma stratigraphique un peu simplifié dans lequel les grès pliocènes s'amincissent régulièrement de l'E vers l'W. En réalité, à l'E, au cap Farina, les formations de base sont masquées par la dune plaquée sur le flanc nord, et on ne voit qu'une dalle de grès épaisse d'environ 60 m, apparaissant sur la photographie publiée par Burollet. Toujours dans le Djebel Demmam, mais plus à l'W, la puissance visible passe à 160 m, et elle atteint le maximum de 500 ou 550 m au Djebel Nador, au-dessus de Porto Farina. Puis elle décroît : à 4 km à l'W, à l'Oued Bou Rezem, le sommet des argiles est visible et la série complète n'a plus que 120 m.

BORDURE A SÉDIMENTATION LACUNEUSE. — Le long du promontoire du cap Farina, la mollasse est suivie d'une sédimentation sableuse peu épaisse (coupes 4 et 5 de la fig. 38). Là où la route de Raf-Raf traverse le Djebel Demmam, les sables sont encore durcis. Les pendages s'atténuent peu à peu et la surface sommitale tabulaire est consolidée par un encroûtement. Puis les sables deviennent pulvérulents ; ils n'ont plus que 30 m d'épaisseur au Djebel Demmam, ils s'amincissent encore et disparaissent au voisinage de la route d'El Alia, où persistent seulement les témoins de la transgression à faciès plaisancien. Les sables reparaissent avant la route de Bizerte et restent meubles à la Douiret ez Zaouia, où ils renferment des galets roulés de calcaire crétacé. Ils redeviennent durs à partir de la route de Bizerte. Deux affleurements annexes appartiennent à ce faciès, qui borde les versants sud-est du bassin du Kechabta : l'apophyse du Djebel Menzel Roul, qui se détache vers Utique, formée de 60 à 100 m de passées gréso-sableuses et d'argiles jaunes ou vertes, et la butte de Galaat Andleuss où l'on a de haut en bas :

- 20 m de grès
- 65 m d'argile sableuse brune ou jaunâtre
- 25 m de sable avec des passées cimentées.

Au dessous, le sondage de Galaat Andleuss a traversé 140 m de Plaisancien sans en atteindre le mur.

BASSIN DU KECHABTA. — Dans l'anticlinal du Kechabta le terme supérieur conserve une puissance de 50 à 100 m, mais la sédimentation y est beaucoup plus fine que celle du promontoire du cap Farina. Des sables passant à des argiles sableuses et à des limons sont interrompus par de multiples lits d'argile épais de quelques décimètres. La persistance de l'apparence sableuse est parfois due à l'altération superficielle des argiles. Les passées détritiques gréseuses subsistent en intercalations de grès massif à faciès mollassique épais de 5 à 10 m, détaillés localement sur les coupes 6 et 7 de la fig. 38, mais lenticulaires. La série s'amincit à l'W vers Ferryville et Burollet décrit une plage au Djebel Messeftine, au lieu dit Djebel Et Assafir. Les sables et graviers renferment des galets et des tests roulés et des balles de marnes arrachées à un rivage crétacé.

En dehors du Kechabta, les faciès plaisanciens prédominent sur la rive nord du lac Ichkeul et sur celle du lac de Bizerte à la briquetterie de Menzel Djemil. A Menzel Djemil il y a un banc de mollasse au sommet. Le lac Ichkeul est argileux avec des lumachelles de *Crassostrées* jusqu'à l'émersion villafranchienne datée par le gisement de Vertébrés.

SCHEMA STRATIGRAPHIQUE. — La bande E-W qui rejoint cap Farina au Kechabta traverse les domaines des trois faciès. La fig. 39 est un schéma des variations relevées en assemblant les sept coupes de la fig. 38. A Porto Farina la série atteint une épaisseur de 700 ou 800 m, très supérieure à ce que l'on observe au cap Bon et ailleurs en Afrique du Nord. En Italie du Sud et en Sicile, où le Pliocène est littoral et horizontal, la base n'apparaît pas et il se termine en biseau sur les reliefs de l'intérieur. M. Gignoux [1913] ne mentionne pas l'épaisseur mais seulement les altitudes ; il semble d'après ses coupes qu'elle oscille entre 200 et 300 m, par exemple à Monteleone, à Gravitelli près de Messine ; par le travers du détroit de Catanzaro elle doit atteindre 350 à 400 m. La puissance de la sédimentation relevée au N de la Medjerda ne saurait être considérée indépendamment de la superficie relativement faible du bassin qui l'a reçue, et en définitive elle n'implique pas un volume d'apport anormal. L'accumulation sur place suppose

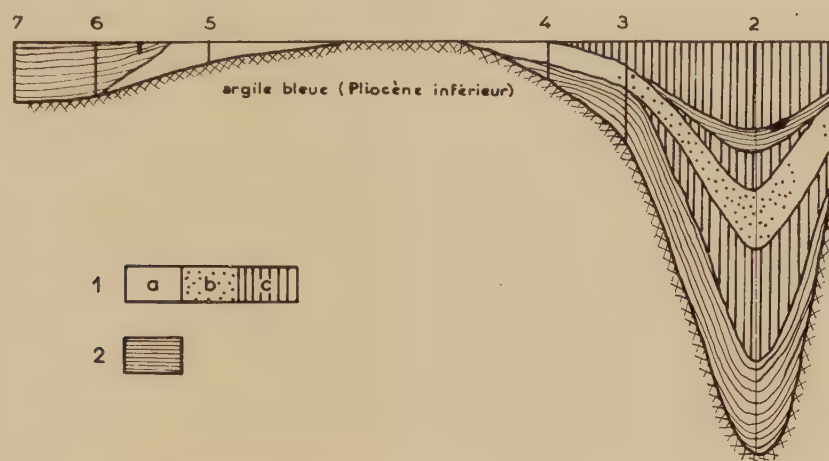


FIG. 39. — Schéma stratigraphique du Pliocène supérieur.

1 : sable (a : meuble ; b : un peu durci ; c : cimenté en mollasse) ; 2 : argile et argile sableuse.
Les numéros 1 à 7, dessus, indiquent les emplacements des coupes de la fig. 38.

une subsidence étroitement localisée, axée sur Porto Farina. Il convient de la rapprocher du fossé de la Manouba et de la dépression du lac de Tunis.

Les variations affectent simultanément les diamètres des grains du matériel allogène et la cimentation des sables. Si les irrégularités de détail dans la calcification formant les grottes sont dues aux caprices de la circulation des eaux souterraines, il n'en est pas de même pour les variations d'ensemble. Le carbonate de calcium, que les eaux continentales ont pu déplacer, est un sédiment marin authigène. Nous avons vu avec le lac de Tunis que sa précipitation était favorisée dans les lagunes où les eaux sont plus concentrées qu'en mer et plus basiques ; l'alcalinité étant d'ailleurs liée aux activités organiques caractéristiques des milieux lagunaires réducteurs. Les irrégularités de sa répartition laissent deviner l'alternance d'eaux marines agitées et d'eaux lagunaires plus calmes.

Le schéma représente en même temps les différenciations allogènes et authigènes, en distinguant à la fois trois dimensions et trois teneurs en calcaire. Le bassin mollassique de Porto Farina est plus calcaire et plus grossier. Avant de chercher à mieux particulariser, on sait déjà qu'il a pu traverser des phases réductrices plus ou moins lagunaires au cours du dépôt, et par ailleurs que la sédimentation fine du Kechabta ne provient pas d'un lagon puisqu'elle est pauvre en calcaire.

CONTRIBUTION DE LA PALÉOÉCOLOGIE A LA DÉTERMINATION DE LA LITHOGÉNÈSE. — La faune est riche mais souvent monotone. Burollet publie les déterminations de M. Arnould. E. Schijfsma entreprenait concurremment l'étude restée inédite de la

microfaune. En relevant les coupes, j'ai vu que les espèces et les conditions de gisement varient avec la lithologie et qu'il était possible d'envisager la paléontologie d'un point de vue nouveau. En s'attachant aux particularités écologiques, on peut demander aux genres des renseignements sur les circonstances du dépôt. J'ai limité ce travail à l'étude de la macrofaune. La microfaune déterminée par E. Schijfsma varie d'ailleurs également avec les gisements.

Il ne faut pas dissimuler plusieurs difficultés. On compare des formes anciennes avec des formes vivantes, or si tous les genres du Pliocène existent, les espèces sont généralement éteintes et notamment ici, on est donc obligé de tenir seulement compte des genres alors que certains habitats risquent d'être spécifiques de l'espèce. Par ailleurs l'écologie des Mollusques n'est pas communément reconnue et le paléontologiste n'y cherche souvent que quelques indications de profondeur. Les renseignements trouvés ne pourront donc être reçus qu'avec réserve et utilisés seulement s'ils se recoupent. D'autre part, on ne saurait assurer que les listes que nous allons donner caractérisent parfaitement chaque gisement, car il est impossible d'avoir récolté tous les genres qui y figurent. De même la notion d'abondance ou de rareté demeure qualitative : elle est subjective ; et quand il s'agit de coquilles incluses dans des grès durs, elle dépend beaucoup de l'itinéraire de l'observateur. Le travail, rendu difficile par la circonspection qu'il demande, sera ingrat pour beaucoup de genres qui ne sont pas spécifiques. Quand il donne des résultats, pour les séries épaisses il faut penser que les variations latérales ont pu s'accompagner de variations dans le temps. Enfin, il reste une autre cause d'erreur : les fossiles ne sont pas nécessairement sédimentés sur place, mais souvent après un long transport. Toutefois les traces de transport doivent se découvrir.

On se déplacera d'E en W sur la ligne cap Farina-Kechabta.

MOLLASSE. — Les coquilles sont incrustées dans les grès, c'est-à-dire difficiles à déterminer et réparties sur toute l'épaisseur. Les valves sont séparées et disposées à plat, l'ouverture indifféremment tournée vers le haut ou vers le bas. M. Arnould m'a accompagné dans le Djebel Demina (coupe 1 de la fig. 38) et a effectué les déterminations :

<i>Pectinides</i> sp. (ab) ¹	<i>Ostrea lamellosa</i> BROCCHI (m)
<i>Flabellipecten flabelliformis</i> BROCCHI (ab)	<i>Mytilus</i> sp. (r)
<i>Chlamys</i> cf. <i>scabrella</i> LMK (m)	<i>Conus</i> , moules internes de grande taille (r)

Ce sont des Pectinidés, toujours disposés de la même manière, qui caractérisent l'ensemble de la mollasse. Les Huîtres sont grandes, et augmentent encore vers l'extrémité orientale du cap où elles atteignent 20 à 30 cm de long.

M. Arnould et moi avons trouvé un terrain plus fossilifère, d'aspect récifal avec des concrétions d'Algues calcaires, au flanc d'une petite falaise érodée, de 10 m de long sur 3 m de haut :

<i>Pinna</i> sp. (m)	<i>Dentalium vulgare</i> DA COSTA (ab)
<i>Venus fasciata</i> DA COSTA (m)	<i>Balanus</i> sp. (ab)
<i>V. brocchi</i> DESH. (r)	<i>Clypeaster aegypticus</i> WRIGHT (r)
<i>Spondylus gaederopus</i> L. (r)	

Les Dentaies sont en amas dans une poche d'argile et de calcaire pulvérulent. Au-dessous, nous avons suivi sur 50 m un niveau très dur de 20 à 50 cm d'épaisseur avec :

Algues calcaires	<i>Spondylus gaederopus</i> L. (m)
<i>Chlamys latissima</i> BROCCHI (ab)	Échinides divers

BORDURE LACUNEUSE. Sur le talus de la route de Raf-Raf (coupe 4) :

<i>Flabellipecten flabelliformis</i> BROCCHI (ab)	<i>Cardium paucicostatum</i> Sow. (m)
<i>F. alessii</i> PHILIPPI (m)	<i>C. exiguum</i> GMÉLIN (r)
<i>Chlamys scabrella</i> LMK (r)	<i>Cardita</i> sp. (r)
<i>C. glabra</i> L. (r)	<i>Balanus</i> sp. (ab)
<i>Panopoea</i> , moules internes (r)	

1. ab : abondant, m : moyen ; r : rare.

A la Douiret ez Zaouia (coupe 5), Arnould m'a accompagné. La faune est caractérisée par une forte proportion de moules internes, ce qui souligne la déficience en carbonate de calcium de ce dépôt resté pulvérulent. Non seulement il ne s'est pas déposé par précipitation chimique mais celui des apports zoogènes a migré. Rappelons que ces moules sont accompagnés de galets roulés apportés depuis les massifs crétacés de l'intérieur. Cela fait supposer la proximité d'une embouchure ou d'un estuaire, critère qui sera retenu pour la reconstitution paléogéographique. Arnould a déterminé :

Flabellipecten flabelliformis BROCCHI (ab)
Chlamys scabrella LMK (ab)
Cardium, moules internes (ab)
Venus, *id.* (ab)
Tellina, *id.* (m)
Cardita venericardia, *id.* (r)
Panopoea, *id.* (r)

Anomia ephippium L. (r)
Cerithium vulgatum BRUG. (r)
Nassa, moules internes (r)
N. dertonensis BELLARDI (r)
Conus, moules internes (m)
Dentalium novemcostatum LMK (m)
D. vulgare DA COSTA (m)

Dans les sables et grès tendres de Galaat El Andleuss :

Flabellipecten flabelliformis BROCCHI (ab)
Chlamys latissima BROCCHI (m)
C. scabrella LMK (m)
Ostrea edulis L. (m)
O. lamellosa BROCCHI (m)
Mytilus sp. (r)

Panopoea, moules internes (r)
Venus, *id.* (m)
Tellina, *id.* (m)
Nassa, *id.* (m)
Cerithium, *id.* (r)
Dentalium vulgare DA COSTA (m)

Le sondage a ramené une pince de Crabe.

BASSIN DU KECHABTA. — Burollet a découvert deux amas localisés rassemblant des espèces abondantes, l'un sur le versant nord du Djebel Kechabta dans le lit de l'Oued Gelaa, l'autre sur le versant sud dans le lit de l'Oued Morra. Il donne une liste. Il a eu l'obligeance de me les signaler et Arnould a déterminé :

Meretrix rudis POLI
Cardium multicoatum BROCCHI
Cardium paucicostatum SOW.

Amiantis brocchii DESH. var. *suborbicularis* SACCO
Vermetus gaederopi MÖRCH, quelques très beaux exemplaires

Mais j'ai surtout envoyé une abondante récolte au Centre d'études et de documentations paléontologiques, où J. Roger a eu l'extrême obligeance d'assumer la tâche assez lourde des déterminations :

Leda (Lembulus) pella (L.)
Arca diluvii L. (juv.)
Glycymeris pilosus (L.)
Anomia ephippium (L.)
Flabellipecten flabelliformis (BROCCHI) juv.
F. cf. flabelliformis (BROCCHI)
F. aff. costisulcatus (ALMERA et BOFFILLE)
F. bosniasckii (DE STEFANI et PANTANELLI)
Chlamys glabra (L.)
C. inaequicostalis (LMK)
C. sp.
Beguina (Glans) intermedia (BROCCHI)
Cardita cf. antiquata (L.) juv.
Phacoides orbicularis (DESH.)
Angulus planata (L.)¹
Gibbula euomphala (PHILIPPI)
Calliostoma conulus (L.)
Astrea (Bolma) rugosa (L.)
Euthria cornea (L.)
Pisania plicata (BROCCHI)
Tritonalia (Hadrana) craticulata (BROCCHI)
Typhis sp.

Cerithium vulgatum BRUG.
var. *alucaster* BROCCHI
Turritella bicarinata EICHWALD
T. tricarinata (BROCCHI)
T. vermicularis (BROCCHI)
T. subangulata (BROCCHI)
Nassa semistriata (BROCCHI)
N. (Telasco) costulata (RENIERI)
Polynices (Neberita) josephina (RISSE)
Natica dillwyni (PAYRAUDEAU)
Scala (Acroscala) geniculata (BROCCHI)
Chelyconus ponderosus (BROCCHI)
Clavatula gradata (DEF.)
Cl. rustica (BROCCHI)
Surcula intermedia (BROCCHI)
Drillia cf. brocchii (BONELLI)
D. allionii BELLARDI
Genota ramosa (BASTEROT)
Terebra fuscata (BROCCHI) juv.
Dentalium vulgare (DA COSTA)
D. dentale (L.)
var. *quatuordecemcostata* (SACCO)

1. *Angulus planata* est une Telline.

En résumant l'ensemble, il apparaît que les Gastropodes et Pleurotomes sont surtout trouvés au Kechabta. Le tableau 14, récapitulatif, répartit les Pélécypodes, Gastropodes, Scaphopodes et les autres classes et embranchements. Dans chaque ordre les genres sont ordonnés de haut en bas suivant leur distribution à travers les différents faciès, les plus orientaux en haut.

	MOLLASSE FACIÉS NORMAL	FACIÉS CONSTRUIT	BORDURE LACUNEUSE		BASSIN DU KECHABTA
			limite de la mollasse	estuaire	
PÉLÉCYPODES					
Pectinides variés..	×	×	×	×	×
<i>Ostrea</i>	très grandes		×	×	
<i>Mytilus</i>	×		×	×	×
<i>Cardium</i>			×	×	
<i>Venus</i>		×		×	×
<i>Tellina</i>				×	×
<i>Pinna</i>		×			
<i>Spondylus</i>		×			
<i>Cardita</i>			×	×	×
<i>Panopoea</i>			×	×	
<i>Glycimeris</i>			×		×
<i>Meretrix</i>					×
<i>Amiantis</i>					×
<i>Leda</i>					×
<i>Arca</i>					×
<i>Anomia</i>					×
<i>Beguin</i>					×
Phacoides.....					×
GASTROPODES					
<i>Conus</i>	×			×	
<i>Cerithium</i>				×	×
<i>Nassa</i>				×	×
<i>Vermetus</i>					×
Divers, nombreux Pleurotomes....					×
SCAPHOPODES					
<i>Dentalium</i>		×		×	×
DIVERS					
Oursins.....		×			
Balanes.....		×	×		
Crabes.....				×	
Algues calcaires...		×			

TABL. 14. — Répartition des Mollusques au Pliocène dans le delta de la Medjerda.

Dans une encyclopédie de 1 000 pages, Walther [1893-1894] envisage la bionomie des mers sous le rapport de sa contribution à la géologie. Un chapitre, « die Lebensbezirke des Meeres », fourmille de renseignements sur l'habitat des Mollusques. Il établit des faciès d'associations faunistiques. La zone littorale est divisée en huit régions selon la profondeur, depuis 1 jusqu'à 420 m ; les faciès varient avec la nature des fonds, surtout de 1 à 3 m. Il traite à part les estuaires et les mers résiduelles, en faisant état d'une communication de Marion [1887] sur les étangs de Berre, où sont distingués les rivages rocheux ou couverts de végétation, les zostères, les sables et vases. Il y a des inexactitudes ou imprécisions, parfois rectifiées par des travaux plus récents.

Les autres ouvrages ont la biologie pour fin. Sven Ekman [1935] caractérise la faune méditerranéenne comme un mélange de formes endémiques et d'apport tropicaux ou nordiques, mais n'est pas assez détaillé pour renseigner sur un petit bassin. Hesse, Alle et Schmidt [1937] publient à New-York une « Ecological animal geography » documentée sur les Mollusques. Les subdivi-

sions plus étudiées que celles de Walther font intervenir tous les facteurs : la zone benthique est dite littorale si elle est éclairée jusqu'au fond ; une zone littorale *stricto sensu* ou *eulittorale* s'étend jusqu'à la limite de la végétation, une zone *sublittorale* lui fait suite. Pour diviser la zone *eulittorale*, ils tiennent compte de l'amplitude des marées, de la nature des fonds, du fait que la côte soit en érosion ou en sédimentation. Un paragraphe traite des estuaires.

A ces traités généraux s'ajoutent des monographies donnant le résultat de campagnes régionales. Celles de Murray et Hjort [1912] ont eu pour but le littoral norvégien et le plateau continental de la Baltique et de l'océan Glacial. Un autre travail plus ancien est précieux parce qu'il concerne la Méditerranée : c'est l'« Esquisse d'une topographie géologique du golfe de Marseille », où A. Marion [1883] a synthétisé les résultats de ses prélèvements entrepris systématiquement devant le littoral et au large, ainsi que dans des lieux variés, vieux port, ancien bassin national, devant la plage du Prado. Il distingue par leur faciès le fond du golfe, les côtes des eaux vives, la prairie de zostère de 4 à 10 m et de 10 à 25 m, le « broundo » provençal et les sables vaseux du large. On peut comparer les récoltes côtières de Marion avec celles effectuées au large de l'Afrique du Nord au cours des campagnes du « Lightning and Porcupine », citées par J. G. Jeffreys [1878-1881].

La compilation écologique donne des renseignements sur beaucoup des genres trouvés. Pour la résumer et la comparer aux observations personnelles, la méthode un peu longue consiste à examiner les genres les uns après les autres. Commençons par éliminer ceux qui ne sont pas spécifiques ou douteux :

— *Cardium*. Au premier rang, *C. edule* est remarquable par sa capacité d'adaptation aux variations physiques et chimiques. On le ramasse encore dans la zone des embruns ; il persiste même dans le lac Nord de Tunis. Kreger [1940] lui a consacré une monographie où il met en évidence son indifférence à la profondeur, à l'éclairage, à la température, à la salinité et donne les écarts qu'il peut supporter.

— *Venus* et *Tellines* sont des formes qui fouillent dans le sable et la vase. Hesse remarque que les *Cardium* qui les accompagnent ne peuvent s'enfoncer mais sont protégés par une coquille plus épaisse. Walther les signale de 1 à 420 m, dans les mers ouvertes et les mers résiduelles, notamment dans l'étang de Berre. Plus de 400 espèces de *Tellines* abondent dans toutes les mers. Hesse les rencontre dans la zone des embruns, Jeffreys en haute mer, Marion et Murray dans tous leurs prélèvements.

— *Cardita*. Walther leur attribue une adaptation de 1 à 190 m, mais Jeffreys les récolte en Méditerranée et en Adriatique jusqu'à 550 brasses.

— *Dentales* sont rarement signalés pour caractériser un faciès. Marion les a récoltés dans des endroits variés, depuis le Vieux Port et l'ancien bassin national jusqu'aux sables vaseux du large ; Pallary dans l'ancienne lagune de Tunis et moi dans la mer d'Utique. J. Roger me les signale au rivage et dans la zone des Lami-naires.

— *Oursins* et *Crabes*. Les habitats varient avec les genres et les espèces.

Les autres genres sont plus significatifs :

— *Les divers Pectinidés* fréquentent aussi bien les eaux libres que les étangs, les rochers que les vases. Hesse les remarque sur les fonds divers de la côte en érosion de la baie de Naples, Walther dans la vase de l'étang de Berre. Toutefois, il y a un caractère restrictif : pour Hesse : ils restent littoraux, Walther ne les indique que jusqu'à 100 m, Murray ne les signale qu'au rivage.

— *Ostrea*. J. Roger me donne les renseignements suivants : *O. edulis* dans la zone intercotidale, 2 à 40 m ; *O. lamellosa* un peu plus profond, fond sableux ou coquillier. Certaines Huîtres affectionnent les vases des lagunes ou des étangs, Walther les y signale. Murray les rencontre dans des étangs côtiers, communiquant seulement avec la mer à marée haute par des chenaux sans profondeur ; à Marseille, Marion ne les trouve que dans l'ancien bassin national. De très grandes Huîtres, dont la taille rappelle celles de la mollasse pliocène ou du Plaisancien de l'Ichkeul, peuplaient la lagune de Porto Farina et n'y disparurent qu'avec la fermeture totale, mais persistent dans le Sebket el Bounta. Pour Hesse elles sont également une forme essentiellement caractéristique des estuaires.

— *Mytilus* affectionne à la fois les lagunes et les eaux vives, les fonds durs et les vases. Murray les trouve dans les étangs et devant les plages de l'océan, fixés sur des Laminaires, Marion dans le vieux port et dans les eaux vives. Jeffreys au large de Bizerte et de Carthagène jusqu'à 60 brasses. Ils apportent un seul renseignement, c'est une forme peu profonde.

— *Spondylus*. Pas de renseignements chez les auteurs. *S. gaederopus* peuple les lagons tunisiens. Pallary le trouve dans l'ancien lagon de Tunis et moi dans les vases de la mer d'Utique en abondance ; il vit actuellement sur les côtes protégées du golfe de Gabès, associé avec les Éponges, sur des vases peu profondes.

— *Panopoea* est une forme fouisseuse que Jeffreys trouve au large de la Tunisie de 5 à 520 brasses.

— *Leda* n'existe pas près du rivage. J. Roger m'apprend qu'elles vivent en dessous de la zone des marées. Elles demandent une salure normale de 28-29 ‰ et un fond vaseux ou sablo-vaseux sans forts courants de fond, avec une teneur en oxygène relativement faible.

— *Arca*. On rencontre beaucoup de coques rejetées sur les plages du golfe de Tunis. D'après Walther fréquentent les vases, soit celles du rivage, soit celles des fonds calmes à des profondeurs supérieures à 140 m. Leur association avec *Leda* indique ici une région profonde.

— *Glycimeris* rampent sur des fonds de sable jusqu'à 200 m, d'après J. Roger.

— *Anomia*. L'habitat est spécifique : loin du rivage. Pour Walther elles caractérisent les fonds de 140 à 400 m ; signalons à ce propos que les profondeurs chez Walther paraissent exagérées d'une manière générale. Marion les récolte dans les zostères de 1 à 25 m et les sables vaseux du large. Jeffreys en trouve de nombreuses espèces, notamment au large de Bône et Tunis. J. Roger me les signale dans la zone des Laminaires.

— *Gastropodes*. On peut distinguer les formes littorales et les formes profondes. Pour Murray, les *Gastropodes littoraux* demandent en général à se fixer sur les fonds durs, leur rareté à l'E du Kechabta est donc significative. J. Roger cite *Pisania maculosa* sur les parties rocheuses, *Tritonalia craticulata* sur les rochers et plages, *Nassa* et *Natica*. Walther signale *Nassa* dans les vases de l'étang de Berre. *Cerithium* est une forme souvent profonde, mais dont la coquille est dure et qui est douée de résistance. Pour Walther il est caractéristique des mers résiduelles. *Cerithium vulgatum* est littoral (J. Roger).

Formes profondes : l'abondance des Gastropodes caractérise plutôt une certaine profondeur. De 140 à 190 m, Walther cite une abondance d'espèces allongées de Pleurotomes, *Fusus*, *Murex*, Turritelles, Cérithes, qui diminuent rapidement au-delà de 190 m. J. Roger m'apprend que les Pleurotomes *l. s.* indiquent des zones plus profondes à sédimentation plus fine. Les individus récoltés sont de petite taille, parfois de quelques millimètres de long, et fragiles ; ce caractère classique des faunes d'herbier est commun à tous les êtres vivant sur la vase, comme le signale d'ailleurs Hesse. C'est ainsi qu'à Monastir, dont le « Monastirien » n'est plus considéré que comme une variation latérale de faciès, le docteur E. Gobert utilise ce critère pour distinguer certaines zones de prairies sous-marines. Malgré la richesse faunique du Kechabta, on y remarque l'absence des *Rissoa*, spécifiques des zostères dans lesquels ils vivent ; ce qui permet de penser que l'habitat de ces Pleurotomes devait être situé au large de la zone des zostères.

Hesse indique que les *Vermets* rampent sur les fonds fins. Dans le golfe de Gabès ils vivent sur les vases associées aux fonds à Éponges. Pallary a trouvé *Vermetus gaederopus* dans les vases de l'ancienne lagune de Tunis.

— *Balanes* vivent fixées, généralement à la surface, et affectionnent les eaux à la fois courantes et chargées en troubles, qui peuvent leur apporter une nourriture riche et renouvelée. On les rencontre dans le canal dragué au milieu du lac de Tunis, fixées aux pieux des bordigues. Marion les trouve dans le vieux port et sur le littoral des eaux vives.

— *Algues calcaires*. Marion recueille celles qui encroûtent les roches du littoral des eaux vives.

Ces données vont permettre de conférer toute sa signification au tableau de répartition des genres que j'ai établi. Les fonds pliocènes descendent et s'écartent du littoral vers l'W, où apparaissent *Anomia*, *Arca*, *Leda*, et les Pleurotomes, tandis que disparaissent plusieurs des formes littorales. Au contraire la partie orientale des affleurements semble très proche d'une côte ; l'association *Ostrea*, *Spondylus*, *Nassa* a pu peupler des anses ou des lagunes, les Balanes et les Algues calcaires se trouvant aussi à faible profondeur mais en eaux vives.

Par conséquent la sédimentation la plus puissante s'est effectuée sous la nappe d'eau la plus mince. Ce caractère bien particulier à la région a persisté au Quaternaire, où la sédimentation subsidente a remblayé des zones d'appel sédimentaire peu marquées, comme la Manouba-Sedjoumi ou le lac de Tunis. Ce qui surprend davantage, c'est de trouver la mer libre vers l'intérieur

du pays, et d'être obligé au contraire de supposer une terre émergée à l'emplacement de l'actuel golfe de Tunis. Si la mer libre du Kechabta ne pouvait ouvrir sur le golfe, il fallait que le passage soit au N ; les affleurements à faciès plaisancien du N, Ichkeul et Menzel Djemil, en témoignent. Les lagunes résiduelles de l'Ichkeul et de Bizerte restent les vestiges du golfe du Kechabta.

La présence simultanée en quelques points de formes à l'écologie opposée suppose des transports.

CYCLOTHÈMES MOLLASSIQUES. — Les résidus insolubles allogènes accumulés sont plus grossiers que ceux d'Utique et de Tunis. C'est la phase antérieure du fractionnement de Goldschmidt, quand les reliefs étaient plus abrupts. Le volume suppose un grand fleuve. Au Pliocène, comme au Quaternaire, c'est la Medjerda qui était le collecteur du réseau hydrographique de l'Algérie orientale et de la Tunisie du Nord. Son embouchure a pu être identifiée à proximité de la bordure à sédimentation lacuneuse. L'étude du delta actuel montre le rôle des vents et des houles sur ce rivage ; ceux du NW se propageaient librement à travers la mer du Kechabta et pouvaient venir accumuler le matériel sur les terres émergées de l'E (par cheminement littoral).

La Medjerda pliocène traversait déjà des cycles deltaïques, faisant alterner de brèves phases d'eaux vives marquées par le développement des Balanes et des Algues calcaires, avec des phases lagunaires pendant lesquelles vivaient les Huîtres, Cérithes et *Nassa*, tandis que les *Spondylus* rampaient sur des fonds de vase déposée en décantation. L'aspect lenticulaire prouve la coexistence des différents faciès. On distingue dans les argiles intercalaires des horizons rougeâtres qui pourraient bien résulter d'émersions momentanées.

Voici le détail d'une coupe relevée dans le Djebel Demina au-dessus de la source dite Aïn El Aïoun. L'expression Aïn El Aïoun, littéralement « la source des sources », dépeint le collecteur d'une série de petites émergences, suintant à la base d'un banc de grès au-dessus d'une stratification argileuse. De bas en haut, on a :

— banc fossilifère dont les valves sont disposées à plat, associé à une teinte rouge	=	0,50 m
— argile avec des plaquettes ondulées de tuf	=	0,50
— limons de ruissellement avec rognons de tuf et fragments de grès mollassique roulés	=	env. 5

Cela semble nettement un cordon littoral émergé avec une plage sur laquelle s'accumulent des coquilles, recouvert bientôt d'une carapace de croûte et ultérieurement d'un remaniement continental. A Foum El Oued on voit les coquilles arriver sur la plage. D'après E. Wasmund [1926] elles se déposeraient principalement un peu en dessous de la surface des eaux.

D'une manière générale, la mollasse pliocène est formée d'une masse azoïque renfermant des horizons enrichis en valves plates de Pélécytopodes (Pectinidés et Huîtres). Chose importante, les valves bombées sont disposées indifféremment sur leur face dorsale ou ventrale. Quand il s'agit d'animaux fixés, K. Krejci [1926] explique que cela résulte d'un transport, car si elles s'étaient fossilisées à l'endroit de leur mort, la face convexe serait restée en dessous, maintenue par le byssus. Les gisements fossilifères des mollasses sont donc des gîtes d'accumulation. Ils supposent par conséquent que le régime lagunaire des bassins à sédimentation calcaire partiellement argileuse était interrompu par des zones parcourues de courants assez vifs pour emmener les coquilles vides, qui pouvaient s'accumuler à l'emplacement des rides sous-marines. Mais l'accumulation a dû souvent s'effectuer sur de véritables talus de déferlement, bordant des cordons littoraux émergés.

Il serait assez plausible que des gîtes d'accumulation sur des rivages lagunaires se soient constitués à la suite de mortalités massives résultant d'un changement de milieu, même s'ils contiennent un pourcentage assez élevé de Cardiidées dont la grande tolérance aux variations de milieu est généralement admise. Une étude récente, comme celle de A. Karpevich [1946] au N de la Caspienne, découvre en effet des *Cardium* stenohalins et stenothermiques, dont l'euryhalinité

et l'eurythermicité apparente ne seraient acquises que grâce à leur fécondité, chaque changement s'accompagnant d'une mortalité massive. Ces faits seraient peut-être à rapprocher de ceux qui ont été observés dans la lagune de Tunis, et les bancs fossilifères irrégulièrement répartis dans la molasse traduiraient les variations du régime lagunaire. La fossilisation est toujours accidentelle.

Du moment qu'il existe des espèces remarquables par leur écologie particulière, il est évident que des critiques fondées peuvent être adressées à un travail comme celui-ci, basé seulement sur l'écologie des genres. Dans cet ordre d'idées, à l'embouchure du Danube où les conditions sont diversifiées, S. Gillet [1929] a pu montrer que les différents milieux biologiques n'étaient pas habités par des Cardiidées identiques, mais qu'il y avait des espèces distinguables par quelques détails morphologiques, particulières à chaque milieu. D'une manière générale, c'est sans doute à des déterminations morphologiques insuffisamment précises qu'il faut attribuer les difficultés d'interprétation, concernant par exemple certaines faunes « chaudes » ou « froides ». Mais dans le cas présent, l'approfondissement vers l'E des faciès de Porto Farina, déduit de nombreux indices toujours convergents, me paraît malgré tout très probable.

ESTUAIRE. — Dans le lit sableux des courants vivaient des formes fousseuses : *Panopoea*, *Cardium*, *Venus*, Tellines, etc... *Ostrea*, *Mytilus* sont caractéristiques des estuaires. Sur la route de Raf-Raf, en bordure, les Balanes abondent. En même temps que les galets crétacés, le courant a apporté des Mollusques étrangers : *Nassa* des vases, *Cerithium* des lagunes et plages, *Anomia* qui arrive de la mer profonde, tout près à l'W. En laboratoire, Menard et Boucot [1951] déterminent expérimentalement sur des Térébratules les conditions de transport des coquilles, comparativement à celui des galets. En plus des dimensions ils font intervenir les notions de *densité effective* de la coquille pleine d'eau et de *sphéricité*. La vitesse du courant nécessaire au déplacement, qui dépend encore de la granulométrie de la surface de frottement, est dix fois plus faible que celle demandée pour déplacer un galet de même dimension. Elle doit généralement atteindre 10 cm/sec. Une valve séparée de 1,5 cm de long peut être retournée dorso-ventralement à partir de 14 cm/sec.

COURANTS SOUS-MARINS DU KECHABTA. — Dans les deux gîtes d'accumulation quelques formes littorales sont mélangées au peuplement profond.

Coupe de l'Oued Morra, sur le versant sud du Kechabta (Morra signifie amer et s'applique à des eaux concentrées par l'évaporation). Le plancher de la formation est un banc mollassique à *Flabellipecten flabelliformis* et Huîtres indiquant une extension cyclique antérieure de la zone deltaïque de l'E. La sédimentation vaseuse qui l'a recouvert a été accompagnée par un dépôt coquillier. De grands Lamellibranches, blancs et très fragiles, sont posés directement sur le plancher gréseux, tandis que de petits Pleurotomes légers sont restés plantés verticalement dans les couches de vases plus élevées.

Ce serait une erreur de supposer un fond calme. La position verticale implique au contraire une descente dans un mouvement tourbillonnaire, comme l'a observé W. Kegel [1952] à Rio de Janeiro pour des Moules et d'autres Lamellibranches allongés. Les vases déposaient par décantation à la base d'une zone tourbillonnaire, comme dans la baie actuelle, et c'est la turbulence qui a concentré les coquilles. Ce sont ces courants qui ont pu entraîner au-dessus du gîte les formes littorales *Pisania*, *Nassa* et *Natica*, arrachées au rivage.

Coupe de l'Oued Gelaa, versant nord du Kechabta. L'horizon fossilifère de la base renferme un amas de Lamellibranches disposés à plat, avec les valves isolées indifféremment dans le sens ventral ou dorsal. C'est un transport par un courant de fond, et une accumulation en un point favorisé de restes provenant d'une grande étendue.

L'horizon supérieur est plus complexe. De bas en haut on a :

- | | |
|---|----------|
| — argile bleue avec nodules ferrugineux | |
| — la même, renfermant des poches de sables roux avec amas de coquilles | = 0,50 m |
| — la même, intercalée de lits sableux ferrugineux avec de rares coquilles | = 0,40 |
| — sable avec nodules d'argile et concrétions sableuses roulées | = 1 |
| — grès sableux lités. | |

Cette succession peut ainsi s'interpréter :

Sur un substratum de vase, les chenaux roulaient des sables et des coquilles. Les premiers apports s'enfoncent en poche dans le plancher vaseux. Le phénomène s'est progressivement intensifié : les coquilles plus légères ont été entraînées plus loin, et avec un volume accru de sable sont arrivés des nodules arrachés à un rivage. Les concrétions de fer oxydé du niveau de base sont les premiers symptômes de l'agitation des eaux qui ont oxydé les sulfures comme dans le canal de Tunis. Les grès du toit sont des grès à « ripple-marks ». Les faunes littorales mélangées aux autochtones sont petites : *Pisania*, *Tritonalia*, *Nassa*, les grands Pélécy-podes n'ayant pu être déplacés jusque là. Les *Flabellipecten* et *Chlamys* restent de petite taille et ne se trouvent que dans la lumachelle inférieure. Sur les lits sableux déplacés rampait *Glycimeris*, tandis que les *Vermets* fouissaient dans les vases.

Les deux poches fossilifères se disposent sur un axe unique, définissant ainsi le lit des chenaux sous-marins. On connaît bien aujourd'hui des formations similaires devant les embouchures et jusque loin au large. Dans les vastes fonds calmes vivait *Leda pella*.

RIVAGES STABLES. — En dehors des plages du delta en déplacement continu, les rivages stables bordaient les reliefs formant son cadre orographique ; ils limitent l'extension du golfe du Kechabta et facilitent la reconstitution paléogéographique. Burolet en décrit un dans la région de Ferryville, là où les dépôts marins du Kechabta se terminent en biseau marqué par des galets, des coquilles roulées et des rognons de marnes crétacées.

J'en ai trouvé un autre sur la côte nord avec un affleurement ignoré jusqu'à présent. A l'E de Bizerte, la côte est en voie d'érosion, mais masquée par une dune montant jusqu'à 220 m que les Eaux et forêts ont fixée par une plantation pittoresque établie en front de mer ; l'endroit s'appelle Rumel ou Rmel, qui signifie sable. Au niveau de la mer une falaise, qui perce la dune, est constituée par un anticlinal de Pliocène marin. Il y a 60 m de sables argileux et de sables consolidés visibles. Ils sont intercalés de 6 à 7 horizons fossilifères de 10 à 20 cm, exclusivement constitués de valves de grand *Pecten* de 5 à 10 cm de diamètre à plat dans le plan de stratification et indifféremment tournées sur le dos ou le ventre (Pl. III, fig. 2). Cela paraît le type d'une accumulation non loin d'un talus de déferlement. L'ensemble est recouvert par la plage tyrrhénienne et le rivage actuel passe au même endroit, cette portion du littoral ne s'étant pas déplacée depuis le Pliocène. Elle recevait au Pliocène une sédimentation abondante, mais elle a dû commencer à s'éroder après la fermeture de la barrière nord et le détour de la Medjerda vers le golfe de Tunis.

II. Pliocène lagunaire de Gammart.

Une bande argileuse, épaisse de quelques dizaines de mètres et plusieurs fois interrompue, entoure le versant sud du plateau de Gammart, qui n'est pas recouvert par la dune. Pomel [1884] avait dès l'abord reconnu le Pliocène en 1877, mais G. Le Mesle [1888] pense que les *Ostrea crassissima*, qui abondent et forment des lumachelles, sont miocènes. M. Solignac [1927] ne trouve pas d'autres fossiles, approuve et décrit du Vindobonien recouvert par un complexe continental pliocène. La carte au 500 000^e de la Tunisie (1951) ne représente que du continental. Mais les Crassostrées, vivant de l'Éocène au Quaternaire, ne sont pas de bons fossiles stratigraphiques ; il y en a de très grands exemplaires très semblables à la fin du Pliocène de l'Ichkeul.

Ayant découvert des affleurements non reconnus vers l'E, dans la pente de la falaise dominant la plage de Gammart, avec des grès zoogènes d'aspect pliocène, j'ai cru devoir reprendre la question. J'ai récolté des Huîtres différentes et enfin un *Pecten*. J. Roger reconnaissait :

Ostrea lamellosa BROCCHI du Pliocène supérieur, *Ostrae gingensis* SCHLOTH., *Flabellipecten alessii* PHILIPPI du Pliocène. Une Huître était tapissée d'un Bryozoaire, déterminé par E. Buge comme *Acanthodesia savartii* SAVIGNY AUDOUIN 1826 var. *delicula* BUSK 1859 (*Biflustra*) de l'Helvétien au Pliocène.

L'Helvétien de Gammart, isolé au milieu d'un bassin pliocène, doit donc être révisé. Les faciès rappellent d'ailleurs peu le Pliocène, mais M. Solignac décrivait sur la route de la Marsa à Gammart « un banc de grès jaune tendre avec des débris d'*Ostrea* et de Gastropodes », qui pouvait donner à réfléchir.

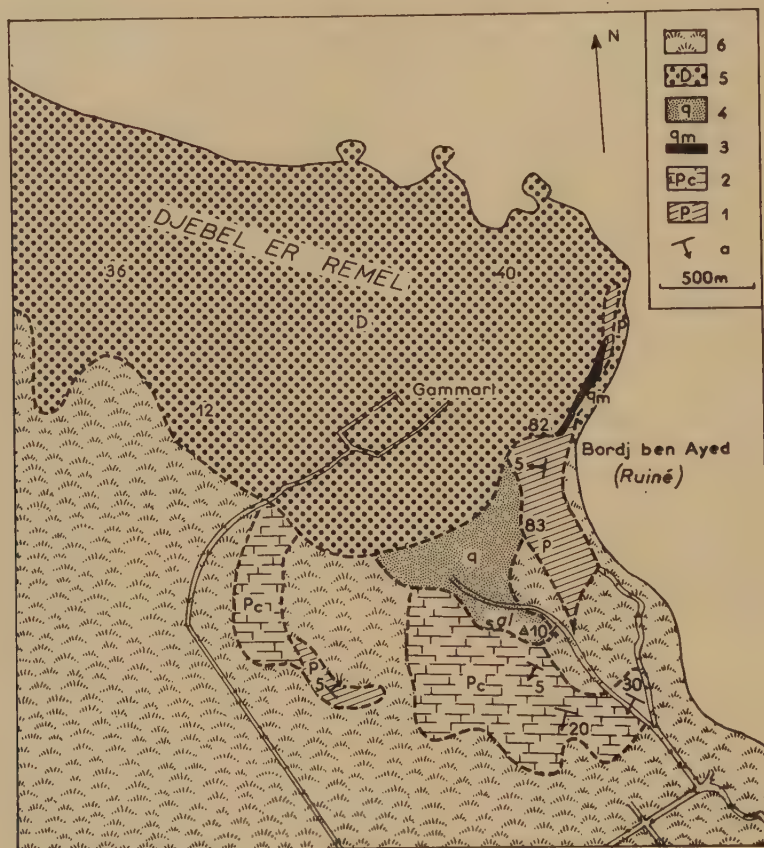


FIG. 40. — Carte géologique de Gammart.

1 (p) : Pliocène marin ; 2 (p_c) : Pliocène fluvial ; 3 (q_m) : plage « tyrrhénienne » soulevée à 60 m environ ; 4 (q) : croûte ; 5 (D) : dune ; 6 : alluvions diverses ; α : pendages exprimés en degrés.

Il semble possible d'affirmer que ce Pliocène marin nouvellement décrit passe latéralement au complexe continental déjà baptisé Pliocène par M. Solignac, quoique les pendages varient trop pour que l'on puisse deviner la prolongation des couches sous les morts terrains. La fig. 40 est une carte géologique de Gammart à grande échelle, qui montre ce que l'on voit de ces passages de faciès. En 1950, on décapait une parcelle de la falaise morte recouverte d'éboulis, bordant la plage de Gammart, pour construire dans la pente une villa en front de mer. Le terrassement amenait à jour des argiles en plaquettes, sans fossiles, versicolores, avec des dendrites de manganèse, qui alternaient avec des bancs sableux lenticulaires. J'ai porté de ces argiles à J. Cuvillier, qui a bien voulu les examiner aux laboratoires de la S. N. P. A. et les a trouvées azoïques. Il doit s'agir de vases aussi proches que possible d'un dépôt continental. C'est à 500 m de là que les bancs marins fossilifères percent les éboulis de pente. Le passage latéral est à peu

près certain. Entre ces bancs, les séries plus tendres qui n'affleurent pas restent peut-être continentales.

L'indécision entre le milieu marin et le milieu terrestre rappelle tout à fait l'amont du delta actuel autour des lagunes de Porto Farina, de la Sebket et de Riana ou du lac de Tunis. La faune très pauvre est presque exclusivement constituée par des Huîtres, qui pouvaient très bien peupler une lagune encore un peu ouverte.

III. Pliocène fluvial.

Les collines situées dans les environs de Tunis autour de la dépression de la Manouba-Sedjoumi forment des croûtes mamelonnées, cultivées, atteignant 200 m d'altitude au Djebel Bel Hanech. Elles sont formées d'argiles et de sables meubles généralement altérés en surface, recouverts d'alluvions, et burinés par l'érosion. La série débute au toit des « horst » crétacés ou éocènes et se poursuit jusqu'aux bassins de remplissage actuels par des changements de pendage progressifs.

G. Castany [1951] étend à la Tunisie les conclusions de R. Laffitte [1948] quand à l'abandon du Pontien. Dans la région de sa thèse, le Continental débute sous le Pliocène marin de Monastir, intéressant le Vindobonien, et se raccorde également sans discordance stratigraphique aux alluvions des cuvettes récentes. Il s'agit d'un complexe Mio-Plio-Quaternaire. Près de Tunis, personne n'a pratiquement jamais trouvé de restes animaux ou végétaux datables. M. Solignac [1927] appelle l'ensemble « Pliocène continental », ce qui laisse supposer qu'il n'a pas observé les pendages, car il en est de verticaux et pour lui les plissements étaient encore antépliocènes. Il mentionne quelquefois des débris de Vertébrés, mais près de Tunis s'il parle de Pliocène c'est sans preuves, car il ne trouve à citer qu'une dent unique ramassée par un amateur et que Ch. Depéret a attribué à un *Hipparion* d'espèce imprécisée. Mais ce travail apporte un élément nouveau, par la découverte à Gammart d'un passage latéral de cette série au Pliocène marin rigoureusement daté. C'est pour la première fois, ici, la certitude d'une sédimentation continentale pliocène, contemporaine de la sédimentation marine. Nous allons voir qu'elle est d'origine fluviale dans le bassin de la Medjerda.

Mais le passage de faciès ne limite d'ailleurs pas au Pliocène l'ensemble du complexe continental, car la transgression marine n'a pas empiété assez loin sur la plateforme tunisienne pour diviser le cycle continental que Laffitte et Castany font commencer au Miocène, tandis qu'au sommet il n'y a pas de différences lithologiques avec les dépôts laissés par la Medjerda quaternaire dans la vallée de la Manouba. Étant donné le caractère récent de la tectonique, on ne peut opposer des couches inclinées à des formations horizontales. La seule distinction découle de la position des collines au-dessus du niveau de la plaine alluvionnaire, et elle est sans signification. Le terme Mio-Quaternaire sera le seul convenable ; davantage de précision s'obtiendrait au détriment de l'exactitude.

Une description détaillée serait fastidieuse, puisque restreinte au faciès fluvial. Les sables et argiles, même épais de plusieurs dizaines de mètres, sont toujours lenticulaires. Par exemple le banc de grès, sur lequel a glissé la loupe argileuse qui a barré l'Oued Lil, s'interrompt brutalement. Les intrications entrecroisées s'observeraient dans le détail si le recouvrement ne les dissimulait pas. R. Strohl, Ch. Gottis et moi avons examiné les assises de réservoirs destinés à la distribution des eaux de Tunis ; sur notre demande on a creusé des tranchées suffisamment profondes pour découvrir le terrain en place, dissimulé sous 1 à 2 m de terre végétale, d'éboulis ou de limons à Escargots. Des sables et des sables gréseux alternent avec des argiles compactes bleues ou grises et les relaient. Les sables sont souvent consolidés, mais d'une manière imparfaite

et irrégulière avec formations d'amas gréseux de quelques mètres de long. La même chose est visible le long du talus de la route de Medjez El Bab.

Des traces de rivage et de déplacements d'une surface d'eau peuvent se voir en deux endroits : à l'Ariana, en dessous du préventorium de l'hôpital israélite, on trouve la bordure d'un cours d'eau lent (un méandre par exemple) ou d'une mare à la base d'un banc de grès rouge dur assez bien cimenté à ciment siliceux, constitué de gravillons siliceux roulés de quelques millimètres jusqu'à 1 cm de diamètre. Elle n'a déposé que 20 à 30 cm d'argile non gypseuse, mais légèrement calcaire. Dans la zone d'émergence de bordure, sous l'influence de la dessiccation, la masse s'est d'abord fendillée ; plus loin elle s'est complètement fragmentée et les débris à cassure très anguleuse sont repris et inclus sans transport dans la sédimentation grés-sableuse encaissante, réalisant une fausse brèche visible sur une vingtaine de mètres dans le prolongement de la lentille argileuse. Il y a exactement la même chose à Gammart, au-dessus de la route qui va de la Marsa au champ de tir.

Quittant la région de Tunis, on trouve la série mio-quaternaire localisée dans le fossé en subsidence, qui traverse la Tunisie du Nord dans le sens des plissements SW-NE, de Gardimaou à la frontière jusqu'à la plaine d'Utique. Elle est formée par les alluvions du fleuve depuis le Miocène. Là les changements de faciès peuvent intéresser tout un massif. J'ai levé au 20 000^e le plus exceptionnel avec M. Arnould, X. des Ligneris et P. Sainfield en 1945, près du barrage réservoir de l'Oued Mellègue. Il s'allonge sur 20 km, formé de 600 à 1 000 m d'un matériel détritique grossier avec du sable, du gravier, des lits de galets épais de plusieurs mètres. Cette masse torrentielle suppose l'érosion d'une haute paroi riveraine et a pu être enfermée dans un bassin versant en amont de nouveaux défilés. Ailleurs le dépôt est fin avec prédominance d'argile.

Le régime continental ne diffère pas de celui du Quaternaire. Les anciens dépôts sont aussi épais que ceux qui remblaient les subsidences récentes. Comme eux ils sont apportés par la Medjerda, et les massifs lenticulaires qui pointent sur la carte géologique comme autant de systèmes distincts, proviennent du remplissage de dépressions séparées, dont l'alluvionnement est plus ou moins grossier suivant leur position géographique et leur relation avec une orographie maintenant arasée. Ils s'alignent sur l'axe de la Medjerda, puis disparaissent sous la sédimentation récente du littoral, mais des pointements les prolongent jusqu'à Gammart au lieu d'accompagner la vallée dans sa dérivation nouvelle vers Utique, témoignant d'un bassin amont situé au S du golfe du Kechabta et du delta de Porto Farina.

IV. Paléogéographie du delta.

La transgression eustatique, par laquelle débute le cycle pliocène, balaie le delta alluvionnaire. Pendant une longue période, le pays côtier restera noyé sous la mer des vases bleues du Pliocène inférieur. Les variations locales, objets de l'étude, s'effacent alors devant ce phénomène général. Quand arrive la régression, l'importance relative des facteurs locaux s'affirme et la sédimentation se différencie, permettant de reconstituer le delta malgré la surface restreinte occupée par les affleurements.

Puisque la mollasse de Porto Farina s'accumulait devant un rivage, il semble qu'une terre émergée s'étendait nécessairement à l'emplacement de l'actuel golfe de Tunis. Celui-ci n'existait par conséquent pas encore, ou plutôt il était décalé vers l'W jusqu'au golfe du Kechabta, élargissant d'autant le cap Bon. Cette interprétation est confirmée par la position du Pliocène marin du cap Bon, qui ne se trouve que sur sa côte orientale et manque sur celle du golfe actuel. Ce promontoire élargi ne pouvait d'ailleurs être l'amorce d'un pont vers l'Italie, car le détroit de Sicile était déjà effondré avec formations de dépôts marins sur la côte italienne du Sud. D'autre part,

le rivage, dont l'anticlinal du Rmel laisse deviner la proximité, paraît séparé des terres du promontoire par les affleurements marins de Porto Farina et ne peut guère s'expliquer autrement qu'en supposant une île. Encore aujourd'hui une ossature de calcaires éocènes et campaniens, indiqués sur la carte géologique au 500 000^e de 1951, soutient ce rivage et se prolonge par des hauts fonds jusqu'à l'île Cani. La fig. 41 est un schéma paléogéographique.

Au même titre que le cap Bon élargi, c'est l'île du Rmel qui rendait possible l'accumulation des alluvions chassées au littoral par les vents du large et la formation de la mollasse de Porto Farina. Des tombolos étaient susceptibles de se former périodiquement et de la relier à la côte, comme aujourd'hui l'isthme de l'Ariana qui rejoint Gammart à Carthage. Sous l'effet des transports littoraux en bordure du golfe du Kechabta, ils pouvaient dériver et se disperser. C'est leurs



FIG. 41. — Paléogéographie du delta pliocène.

1 : affleurements (marin, littoraux, lagunaires ou fluviaux) ; 2 : terres émergées ; 3 : cours de la Medjerda.

passages cycliques (visibles dans les épisodes littoraux de la mollasse) qui isolaient les lagunes, les comblaient, tandis que derrière eux s'ouvrait un nouvel accès aux eaux vives. La Medjerda arrivait des lagunes de Gammart. A la faveur des tombolos, l'estuaire dont il reste trace approchait l'île. Le courant sous-marin du Kechabta est aussi orienté vers Gammart et a pu prolonger une embouchure déplacée en retrait au cours d'une séquence.

Le rivage de Messetfine limite le golfe du Kechabta, ainsi que le sondage de la route de Bizerte qui n'a vraisemblablement pas trouvé de Pliocène marin. J. Roger est frappé par le grand nombre d'espèces éteintes qu'il a déterminées dans la faune du Kechabta ; il semble que ce caractère soit en accord avec le fait qu'elles peuplaient une mer assez fermée.

Le golfe du Kechabta disparaît à la fin du Pliocène. L'émersion est datée par le gisement villafranchien de Vertébrés de l'Ichkeul. La Medjerda a alors abandonné le bassin d'Utique pour se chercher une nouvelle voie vers Tunis, amorçant ainsi l'épisode « manoubien » de son histoire.

La plaine d'Utique sans doute couverte de dunes restera longtemps au repos, jusqu'au Quaternaire récent où un glissement de terrain fortuit à l'Oued Lil lui rouvrira une activité sédimentaire. L'assèchement du Kechabta a été favorisé par une phase tectonique soulevant la barrière de Bizerte, mais il faut retenir qu'il coïncide avec l'accentuation villafranchienne sans doute eustatique de la régression pliocène, car c'est le dernier événement général à influencer la marche du delta. Au Quaternaire, qui doit être considéré comme un simple prolongement du cycle pliocène, il ne se produit plus rien qui permette de synchroniser les événements locaux avec l'échelle stratigraphique.

C'est l'étude de chacun des faciès, littoral, lagunaire ou fluvatile, et de ses relations avec la Medjerda qui nous a conduit à la conception nouvelle du delta pliocène de ce fleuve. Le delta tertiaire de la Medjerda n'est d'ailleurs pas une exception ; J. R. et R. D. Russel [1939] pressentent celui du Mississipi, A. Bonnet et M^{me} Duboul-Razavet [1952] trouvent du Pliocène marin dans les sondages de la basse vallée du Rhône. Mais, normalement, l'alluvionnement actuel recouvre tout. Ici le Pliocène du substratum, d'un aspect non encore observé, a été mis au jour sous l'effet d'une tectonique particulière à laquelle le chapitre suivante est consacré.

CHAPITRE V

TECTONIQUE QUATERNAIRE. DÉFINITION D'UNE SÉDIMENTATION SYNOROGÉNIQUE¹

Plissements quaternaires. — Continuité de l'orogénie plio-quaternaire régionale. — Subsidence. — Sédimentation synorogénique et discordances apparentes. — Incidences sur le relief, comparaison avec la *néotectonique* de Russie et d'Asie. — Le plissement considéré comme un phénomène actuel. — Sismicité. — Hypothèse du décollement de l'Atlas tunisien.

Si le projet initial de contribuer à l'étude de phénomènes généraux en cherchant à les circonscrire dans une enceinte limitée s'est avéré fécond en ce qui concerne la pétrographie, dans cet ordre d'idée la tectonique est décevante, car elle ramène nécessairement à la seule échelle du pays choisi.

Le sujet à traiter est difficile à définir. La phase orogénique principale a été pliocène ou même quaternaire, mais elle affecte des séries précédemment plissées, dont l'étude détaillée suppose au préalable une stratigraphie et une cartographie qui font déjà l'objet des publications de G. Castany et P. F. Burrollet et de travaux inédits, notamment de E. Berkaloff, P. Planchon, E. Dumon, J. Archambault, Tahar Amira. Ils ne demandent pas de compléments ; il serait hors de propos de les répéter sans y ajouter. D'autre part il est impossible de se restreindre à la région des bassins de sédimentation, dont la tectonique non immédiatement visible dépend de celle du cadre orographique. Après avoir décrit les mouvements récents déformant la plaine deltaïque, on les raccordera d'une façon synthétique aux plissements atlasiques à l'aide de la carte géologique présentée au début, pour en retenir ce qui concerne la série plio-quaternaire.

PLISSEMENTS QUATERNAIRES. — Ils ne surprendront plus en Afrique du Nord, comme c'eût été le cas à l'époque où Ch. Depéret et le général M. de Lamothe établissaient des synthèses en classant les terrasses d'après leur altitude. Depuis que M. Dalloni [1915] a décrit des fractures et discordances post-villafranchiennes, de nombreuses observations ont révélé des mouvements quaternaires plus ou moins récents et précisé leur ampleur. Une récapitulation de ces déformations récentes trouve sa place dans l'étude d'une région, dont elles sont la seule partie tectonique. Outre son intérêt propre, cette récapitulation permettra de situer la tectonique tunisoise récente dans l'orogénie nord-africaine. Je n'ai pas essayé de présenter un fichier bibliographique complet ; dans le cas notamment où plusieurs auteurs décrivent successivement le même objet, je me suis limité plutôt à l'inventeur ; dans le cas où c'est le même auteur qui a complété progressivement ses observations, je cite de préférence une synthèse.

En Tunisie, à Monastir, M. de Lamothe [1905] avait trouvé deux terrasses pléistocènes à *Strombus* à deux altitudes différentes. A partir de quelques distinctions de faciès il a voulu voir des extinctions d'espèces accompagnées de migrations ; en extrapolant il a opposé une faune chaude

1. Dans cette partie le mot *orogénèse* sera entendu dans le sens le plus simplement étymologique, indépendamment des restrictions qui l'opposent parfois à une *épirogénie*.

à une faune froide et finalement a créé un étage *monastirien* qui trouva sa place dans les ouvrages de licence. M. Solignac, au contraire, admettait la continuité des deux terrasses dans la notice de la carte au 500 000^e de Tunisie [1947] bien qu'il ait rédigé sa thèse selon les vues classiques de l'époque [1927]. C'est en observant des terrasses étagées sur le littoral marocain dans la région de Safi que J. Bourcart [1949 a et b] a découvert les premiers éléments de la théorie de la flexure continentale, dans laquelle les continents en érosion s'élèvent pour retrouver leur équilibre isostatique par rapport à la plate-forme continentale où l'accumulation sédimentaire crée une surcharge. Mais sa conception suscite un contradicteur au Maroc même, où M. Gigout [1948 b] défend le Quaternaire de Depéret et de Lamothe et place cinq transgressions marines sur le littoral atlantique. Il appelle Ouljien celle de 5-8 m [1949], critique la théorie de la flexure continentale au XIX^e Congrès géologique d'Alger [1952], J. Bourcart [1952 a] la défend et nie précisément l'Ouljien [1952 b].

Assurément valables en bordure de blocs continentaux stables, les idées de Depéret deviennent de toute manière difficiles à soutenir en Afrique du Nord devant l'importance de mieux en mieux reconnue des déformations du *bâti continental*. Certains des déplacements observés découlent du plissement lui-même, d'autres peuvent résulter de tassements, glissements de terrains ou décollement en rapport plus ou moins médiateur avec la tectonique, et peuvent être considérés comme relevant d'une *solifluxion* au sens le plus large du terme. Je me contenterai ici de citer avant les autres les accidents qui concernent directement les unités géographiques définies à partir des grands plis de fond E-W : Atlas saharien, Anti-Atlas ; accident sud-atlasique, Atlas présaharien avec la virgation de l'Atlas tunisien, Atlas tellien.

En suivant l'Atlas saharien d'W en E, la dalle de la Hammada est inclinée parfois à 30° autour des noyaux paléozoïques, rajeunis par conséquent par un mouvement post-hammadien comme le montrent G. Choubert et R. Lavocat [1950]. Au N du Grand Erg, R. Karpoff [1952] voit un Quaternaire à Roseaux dessinant un anticlinal incliné à 8° ; également du Quaternaire déformé à l'Oued Rhir et au SW d'Ouargla. Après Clarion, Hindermeier [1953] décrit un rajeunissement post-pliocène de l'Anti-Atlas dans la région de Tazoult. R. Laffitte [1939] explique comment l'accident sud-atlasique a rejoué au Quaternaire, en se basant surtout sur l'Aurès. A son tour, J. Margat [1953] décrit une terrasse quaternaire plissée dans le Haut Atlas. L'Atlas tellien est en érection post-pliocène ; J. Dresch [1950 b] déduit du réseau hydrographique que les blocs calcaires du Guergour dans la région de Sétif sont soulevés postérieurement au Villafranchien et [1950 a] que le rocher de Constantine s'est élevé postérieurement au Pliocène.

Ces rajeunissements de l'Atlas sont identiques à des plissements tectoniques récents, qui ont été étudiés d'une manière peut-être plus systématique en Russie du Nord, ainsi qu'en Sibérie et en Asie orientale, et pour lesquels V. A. Obruchev [1948] a proposé le terme de *Néotectonique*. C'est une néotectonique nord-africaine.

Elle est compliquée par des mouvements en dehors des zones axiales des plis de fond. Il s'agit des flexures bordant les bassins paraliques ou endoréiques ménagés entre les plissements depuis l'Atlantique jusqu'au golfe de Gabès. La *solifluxion* doit être fréquente, mais des déformations tectoniques réelles sont certaines. Au front du charriage rifain, la flexure du Saïs redresse à la verticale un calcaire lacustre épais de 50 à 100 m, dont P. Taltasse [1950] a établi l'âge quaternaire. R. Laffitte [1942] a décrit des gauchissements post-tyrrhéniens autour de la baie de Mosaganem et de la plaine sublittorale de la Habra, il suppose qu'ils se poursuivent parce que les cours d'eau ne traversent pas les thalwegs à leur point le plus bas. Y. Gourinard [1952] a montré que les « horst » d'Oran étaient bordés de Calabrien déformé ; en déséquilibre isostatique, ceux-ci subissent une poussée verticale et surmontent un bourrelet sédimentaire profond entourant une subsidence néogène. L'anticlinal du Sahel et le synclinal de la Mitidja sont séparés par des flexures post-astiennes décrites par L. Glangeaud (récapitulation dans les Monographies régionales du

XIX^e Congrès géologique d'Alger [1952]). Sur le rivage de l'Ichkeul, les couches à Vertébrés villafranchiennes sont subverticales [Laffitte et Dumon, 1948]. Dans sa thèse G. Castany [1951] parle d'un anticlinal quaternaire au Krechem Et Artsouma autour du système endoréique de Kairouan. La flexure du bassin endoréique du Djerid redresse à la verticale des chicots de cailloutis dans lesquels E. Gobert a trouvé une industrie attribuée par R. Vaufrey à l'Acheuléen [Roux, 1911 ; Vaufrey, 1932]. G. Castany et Ch. Domergue [1947] ont vu aussi un banc à *Cardium edule* incliné à 15°. A mon avis, autour du Djerid il s'agit plutôt de *solifluxion*. Les sondages de recherche d'eau de Tunisie ont montré quelques autres subsidences quaternaires auxquelles G. Castany consacre plusieurs notes et notamment une monographie [1949].

Les terrasses de Monastir subissent des flexures orthogonales au rivage et ne se séparent pas de leur arrière-pays, le Sahel tunisien, qui est marqué par des croûtes bombées vues avant guerre par E. Berkaloff et étudiées séparément depuis par Habib Maazoun, Burollet et Dumestre, et moi-même. Les sociétés de recherches pétrolifères ont fait prospector ces anticlinaux par des campagnes telluriques, sismiques et gravimétriques. Quelques sondages les reconnaissent.

Les observations du golfe de Tunis et du complexe deltaïque de la Medjerda seront plus claires, appuyées sur cette somme de travaux, et par ailleurs elles lui apportent quelques éléments nouveaux. L'orogénie est essentiellement villafranchienne ou post-villafranchienne avec l'ouverture du golfe de Tunis et les inversions d'axe qui ont élevé des collines à la place des bassins de subsidence pliocène. Mais elle se poursuit par des plissements plus récents, d'une activité tout à fait caractéristique. Je commencerai par décrire les plus visibles, pour extrapoler ensuite à ceux dont l'interprétation est moins immédiate.

L'accentuation post-tyrrhénienne de l'anticlinal du Rmel est photographiable (Pl. III, fig. 1). Il est formé de Pliocène marin. La corde de l'arc mesure 150 m. A chaque extrémité la plage tyrrhénienne est à 50 cm ou 1 m d'altitude, au centre elle s'élève à 15 m ; il ne saurait s'agir de l'en-croûtement d'un dôme préexistant, parce qu'elle se prolonge sur 10 km jusqu'au cap Zebib toujours aussi mince et au même niveau. A gauche de la photo on distingue d'ailleurs la surface d'érosion tyrrhénienne, tandis qu'au-dessus de la plage il y a une dune consolidée ; de bas en haut la coupe est la suivante :

— surface pliocène	
— graviers cimentés	= 0,50 m
— sable argileux avec fragments de grès pliocène zoogène roulés	= 0,50
— sable à stratification entrecroisée avec débris de faune peu abondants	= 1 à 1,50
— terrasse cimentée très riche en <i>Cardium</i> et en <i>Glycimeris</i>	= 0,50
— dune consolidée	= 1 à 2

L'ensemble est entraîné dans le plissement. La coupe est visible sur la paroi d'une anse, mais l'axe suit la direction générale du rivage. A la lunette de plongée on voit deux falaises sous-marines parallèles, un premier plateau est abaissé de 1 à 4 m, un deuxième de 5 à 8 ou 10 m. C'est une flexure sous-marine qui accompagne la réaction anticlinale. Grâce au petit rayon de courbure, la photo ne laisse aucune prise à la discussion et elle s'applique précisément à une terrasse.

Une autre observation concerne la réaction anticlinale la plus récente décrite jusqu'ici en Afrique du Nord et rapproche encore l'âge des plissements, car elle ne les date plus dans une chronologie géologique mais historique. La récurrence marine d'Utique, épaisse de quelques mètres et qui s'est achevée il y a un millier d'années, constitue le banc repéré. Au centre de la plaine, quelques terrassements de puits ne la rencontrent pas à 3 m au-dessous du niveau de la Méditerranée contemporaine, tandis que le sondage de l'anticlinal de Galaat Andleuss l'a coupée entre 4 et 1 m d'altitude. Nous avons signalé que certains puits y accèdent en bordure de l'anticlinal

de Porto Farina ; après la découverte de ces phénomènes et à ma demande, la topographie de détail a été relevée, la couche s'y élève à 1,30 m avec une erreur inférieure à 10 cm. Le déplacement positif là, négatif ici, interdit toute explication eustatique. Les deux anticlinaux continuent à se plisser de part et d'autre de la dépression synclinale [Pimienta, 1953 b].

On cite assez fréquemment des affaissements ou des oscillations historiques. Tout le monde connaît les colonnades de Pouzzoles et le Mont Saint-Michel. Dans le delta inférieur du Mississipi, les vestiges indiens sont enfouis sous le niveau de la mer par subsidence [Kniffen, 1936].

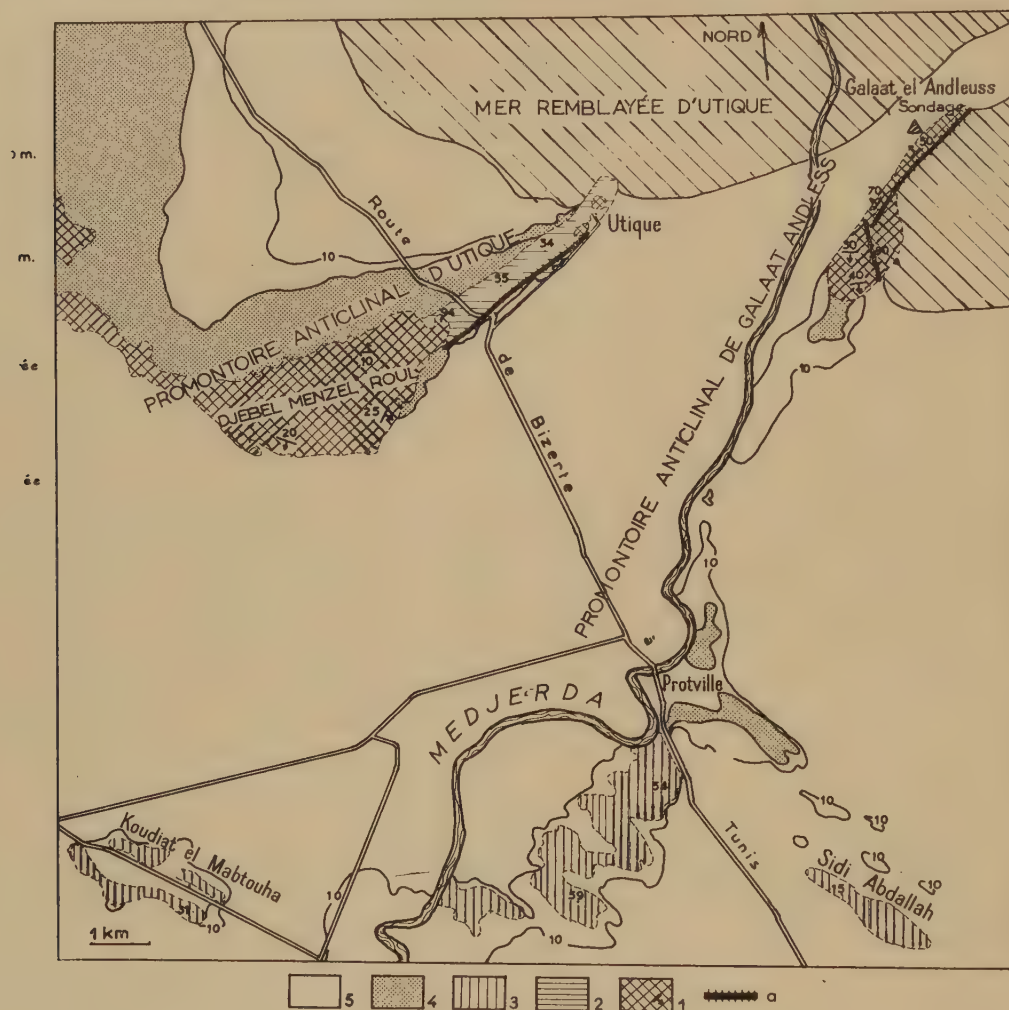


FIG. 42. — Anticlinaux actuels de la plaine d'Utique.

1 : Pliocène avec des pendages exprimés en degrés ; 2 : séquences deltaïques fluviales soulevées avec des points cotés ; 3 : séquences deltaïques marines soulevées avec des points cotés ; 4 : alluvions récentes soulevées à plus de 20 m ; 5 : alluvions d'altitude inférieure à 20 m avec la courbe du niveau 10.

Umbgrove [1950] estime en cm par siècle l'enfoncement du sol hollandais depuis 4 000 ans. Mais un plissement tangentiel historique est beaucoup plus exceptionnel. Il n'en existe à ma connaissance qu'un seul autre exemple et il concerne lui aussi un anticlinal pliocène perçant la couverture d'un bassin deltaïque : l'anticlinal de Shaur au milieu du delta du Tigre et de l'Euphrate. G. M. Lees et N. L. Falcon [1952] ont observé que cette structure qui forme un promontoire allongé était traversée de deux canaux d'irrigation d'un réseau *sassanide*, l'un dans une tranchée pro-

fonde de 12 pieds, l'autre sous un tunnel. A l'aplomb de l'anticlinal, leur fond s'élève de 60 pieds au-dessus du niveau de l'alimentation amont à 2 miles 1/2, ils concluent à un soulèvement postérieur à l'établissement du réseau. Il est plus prononcé même que celui de Galaat Andleuss. La civilisation des Sassanides est vieille de 1 700 ans.

La mesure de la vitesse du soulèvement anticlinal de Galaat Andleuss (plus de 2 m pour 1 millier d'années) permet d'interpréter la topographie de la plaine d'Utique et d'éclairer ses relations avec la tectonique (fig. 44). Il faut y rattacher une observation de la thèse de M. Solignac. Dans le prolongement de l'anticlinal d'Utique il avait trouvé une faune marine à 4 m d'altitude au fond d'un puits. Ne pouvant concevoir une déformation actuelle, il avait imaginé qu'il s'agissait du soi-disant Milazzien de 60 m de Protville, abaissé par une faille supposée. Elle semble plutôt devoir être rattachée à la mer d'Utique et avoir été soulevée de la même manière qu'à Galaat Andleuss.

Les deux promontoires d'Utique et de Galaat Andleuss forment des caps avancés dans la mer de l'époque romaine (fig. 42). On pourrait les assimiler à des dunes, si nous ne connaissions pas leur constitution géologique ; la Mabtouha, Protville et Sidi Abdalla sont des récurrences marines exhaussées, le Djebel Menzel Roul une récurrence fluviale exhaussée. Elles sont en surrection au-dessus de deux axes anticlinaux parallèles et, plus anciennes que la récurrence d'Utique, sont parvenues plus haut. L'érosion facilitée par la non compaction a accompagné la sédimentation synorogénique. Nous ignorons son effet sur les altitudes, mais elle n'a laissé subsister que des buttes témoins ; le talus de Protville est encore rafraîchi par la Medjerda. Outre les deux axes précédents, ces affleurements si particuliers jalonnent un anticlinal transverse de la Mabtouha à Sidi Abdalla. Les anticlinaux sont faillés. La faille du Menzel Roul affecte exclusivement le Quaternaire durci. Le Pliocène de Galaat Andleuss est un anticlinal faillé.

Dans le prolongement des anticlinaux, les sondages de Djedeïda montrent un pendage vraisemblable des séquences marines, mais confus parce que l'épaisseur des cyclothèmes est à la fois variable et très faible et la transgression d'Utique peut être confondue avec la transgression de Djedeïda. Les sédiments de la mer d'Utique se trouvent soulevés à une altitude comprise entre + 5 m et + 1,50 m au sondage 6 A, comprise entre + 4 m et 0 m au sondage 6 C, tandis qu'il n'y a pas de formations marines au-dessus de — 38 m au sondage 4 (coupes au III du chap. I).

A Protville, à la Mabtouha et au Djebel Menzel Roul, le soulèvement affecte des cyclothèmes *utiquiens* qui, rappelons-le, sont vieux au plus de 30 000 ou 40 000 ans, et il atteint cependant là au moins 60 m, ayant même pu excéder cette altitude puisqu'il s'agit de buttes témoins érodées.

A Gammart, sous le Bordj Ben Ayad ruiné, on ramasse de beaux *Fusus* actuels ou subactuels dans les strates surmontant le Pliocène marin à 60 m d'altitude. La plage de la Soukra est élevée à 16 m et c'est pourquoi elle simule une dune (fig. 44).

Les exhaussements de Tunis se comprennent moins immédiatement pour trois raisons : a) le style tectonique général est compliqué par un changement de direction ; b) les subsidences qui débutent plus anciennement avec l'unité *manoubienne*, sont plus accentuées et les flexures ont cassé ; c) il n'y a pas de récurrences marines. Mais il y a des analogies avec Utique, et comme à Utique le recours aux déformations subactuelles permet seul d'interpréter la géographie.

L'encroûtement de l'île Chekli est prolongé par les croûtes, que les sondages de la série suivant la berge du canal Tunis-Goulette ont retrouvées sous les vases du lac. Cela indique une ancienne bande émergée allongée dans le sens du plissement. Elle correspondrait à un anticlinal en surrection actuelle. S'il est maintenant érodé par la transgression qui devait donner naissance à la lagune et presque disparu sous les vases, il n'en a pas toujours été de même, car c'est lui qui retenait en amont le petit bassin endoréique dont l'ombilic constitue la sebkra fossile de l'Ariana (fig. 44 et fig. 32 du chap. III).

La Sebkra Sedjoumi est énigmatique, car on n'aperçoit pas la raison qui empêche l'Oued Miliane de la drainer (fig. 43). Elle n'est séparée de son bassin que par des buttes alluviales hautes d'une vingtaine de mètres qu'aucun profil d'équilibre ne justifie. Elles suivent l'axe anticlinal et il y a tout lieu de les croire soulevées à l'exemple de celles de la plaine d'Utique.

La dépression dans laquelle est établie la sebkra doit être elle-même d'origine tectonique. Reportons-nous à la fig. 2. Le profil de la vallée de Tunis est resté intact, si bien que l'érosion n'explique pas cette surface abaissée au S de l'ancien lit. Elle résulterait plutôt d'une subsidence postérieure au détournement de la Medjerda vers Utique, subsidence que ne compensent plus ses apports.

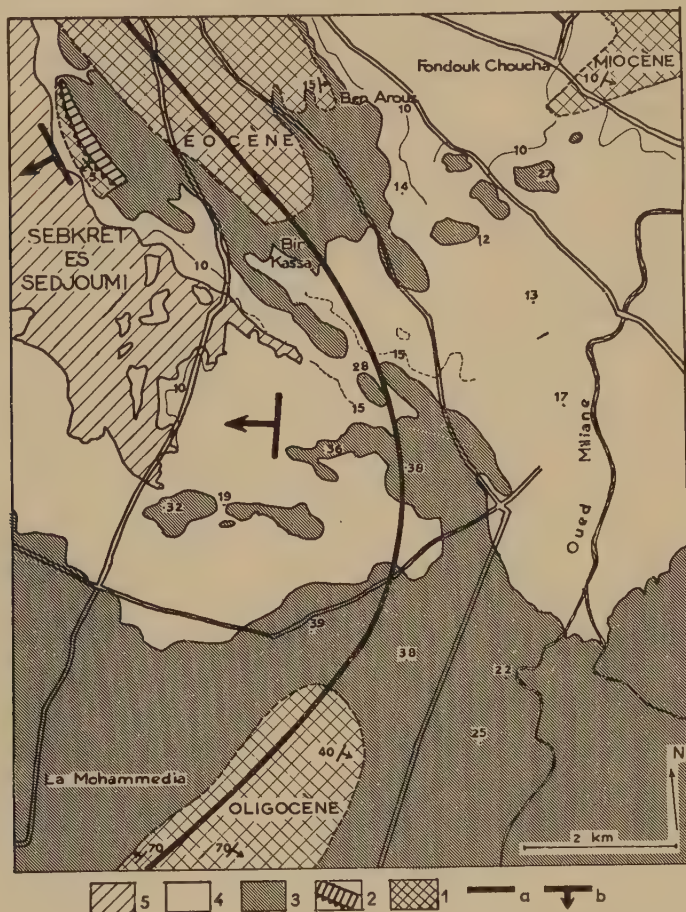


FIG. 43. — Fermeture de la Sebkra Sedjoumi et rejeu actuel de l'anticlinal de Tunis.

1 : Antéquatenaire avec des pentages exprimés en degrés ; 2 : croûte faillée ; 3 : alluvions récentes soulevées à plus de 20 m avec des points cotés ; 4 : alluvions d'altitude inférieure à 20 m avec des courbes de niveau et des points cotés ; 5 : sol de sebkra ; a : soulèvement anticlinal actuel ; b : dépression actuelle.

Les flexures cassées se traduisent par des failles dont le jeu quaternaire est visible, parce qu'elles interrompent des surfaces encroûtées. Telle est celle qui coupe le chicot éocène couvert d'une table de vieille croûte en bordure de la Sebkra Sedjoumi. Au Djebel Naheli, une table identique mais posée sur de l'Aptien surplombe la plaine palustre de l'Ariana. Son bord est cassé et sous elle les marnes croulantes aptiennes forment une falaise de 40 m d'un relief très jeune.

*CONTINUITÉ DE L'OROGÉNIE PLIOQUATERNAIRE RÉGIONALE*¹. — Les déformations précédentes se situent dans le cadre tectonique régional et se raccordent remarquablement aux plissements de l'Atlas tunisien du Nord. Le schéma de la fig. 44 est exécuté d'après le 200 000^e complété avec des structures visibles en dehors de la région cartée. Les numéros des axes anticlinaux renvoient à la description ci-dessous. Les plis affectent deux directions :

Direction SW-NE de la virgation tunisienne.

1) Anticlinal éocène et campanien du cap Zebib à l'île Cani. Il s'enfonce sous la baie de Bizerte, et le Pliocène en surrection post-tyrrhénienne découvert au Rmel en marque l'enselement. Dans le prolongement il y a l'anticlinal du Djebel Messeffine.

3) Le « horst » pliocène de Galaat Andleuss marque un anticlinal qui se poursuit pendant 20 km à travers la plaine d'Utique jusqu'à l'Albo-Aptien de Tebourba dont la voûte est effondrée. Au-delà il fait affleurer de l'Oligocène à Taulierville et de nouveau du Crétacé à Medjez El Bab, 50 km plus loin. Traversant la carte en diagonale il constitue l'ossature axiale de tout le pays.

2 et 4) Les soulèvements anticlinaux actuels de la Mabtouha et Protville ne paraissent pas situés géométriquement sur l'axe, mais il ne faut pas oublier qu'il n'en reste que des buttes témoins.

5) Les « horst » des Djebel Amar et Naheli percent la couverture néogène de la même façon que le « horst » de Galaat Andleuss qui apparaît sous l'alluvionnement quaternaire. Celui du Djebel Amar est faillé dans la direction du pli et compliqué d'une lame de Trias diapir.

6) Séparé de Tebourba par un synclinal oligocène, il fait affleurer du Crétacé inférieur à Massicault.

7) Anticlinal crétacé inférieur à Aïn El Asker et à La Mornaghia, suivi d'un synclinal éocène.

Direction E-W transverse.

11) Anticlinal pliocène à cœur miocène avec des pendages atteignant 60° à Porto Farina. Il s'enselle brutalement à l'W et plus lentement à l'E où il atteint l'île Plane.

12 et 13) Les anticlinaux actuels de la plaine d'Utique pointent aux croisements des deux directions et s'intègrent à ce deuxième système.

14) L'isthme de l'Ariana est un anticlinal transverse qui complique le horst du Djebel Naheli.

Le golfe de Tunis qui s'enfonce en coin dans la chaîne atlasique sépare du cap Bon une branche bifurquée et rebroussée. Le changement de direction, commencé au Djebel Zaghouan et très net aux Djebel Ressas et Bou Kornine, a été bien et plusieurs fois décrit et cartographié par G. Cas-tany, notamment dans sa thèse et dans une note à la Société des sciences naturelles de Tunisie [1952 a]. Sur le croquis, j'ai poursuivi l'anticlinal 10 sous la mer jusqu'au Miocène de Sidi Bou Saïd. Il est vraisemblable que le golfe triangulaire de Tunis correspond à une infrastructure bordée par les bourrelets atlasiques, mais il n'y existe pas de mesures gravimétriques. En tous cas la paléogéographie du Pliocène, telle que nous l'avons reconstituée, s'harmonise avec ce cadre orographique, puisqu'elle suppose que la mer n'est arrivée dans le golfe que postérieurement au Pliocène, si bien que cette invasion tardive pourrait être le résultat d'un effondrement affectant les zones de tension existant le long de ces bourrelets.

L'anticlinal 8 débute dans la direction atlasique avec un petit pointement jurassique au Djebel Oust. Il subit une courbure brutale compliquée d'un petit diapir triasique à la Mohammedia, lieu ainsi nommé à cause d'un palais construit par un Mohammed Bey. Il ferme la Sebokra Sedjourni et il continue par ce que j'appelle la *Barrière de Tunis*. Soit une sorte de « horst » dont émergent seulement quelques écaillés de calcaire avec microfaune éocène. Il y a cinq ou six pitons blancs avec une paroi abrupte qui surplombent la Medina, parfois un fort ou un mausolée au sommet, et concourent au pittoresque du site. A Ben Arous, une carrière travaille pour une cimenterie.

1. Pour me conformer à une nomenclature commode assez courante en Tunisie, j'ai appelé sans distinction « horst » tous les massifs bordés par des failles qui percent la couverture récente, mais ces failles sont en réalité des flexures anticlinales cassées, dont la rupture est généralement provoquée comme je le montrerai par des disharmonies d'origine lithologique, et les petits massifs qu'elles délimitent se sont formés au cours de plissements tangentiels. Il faut donc entendre ici le mot « horst » dans un sens morphologique, sans lui donner aucune signification orogénique particulière.

Une faille longitudinale est nette. La Barrière de Tunis retient le système endoréique de la Manouba Sedjoumi. L'anticlinal 9 de Chekli est une barrière plus ennoyée.

La poussée tangentielle appliquée à l'Atlas tunisien apparaît en définitive comme un phéno-

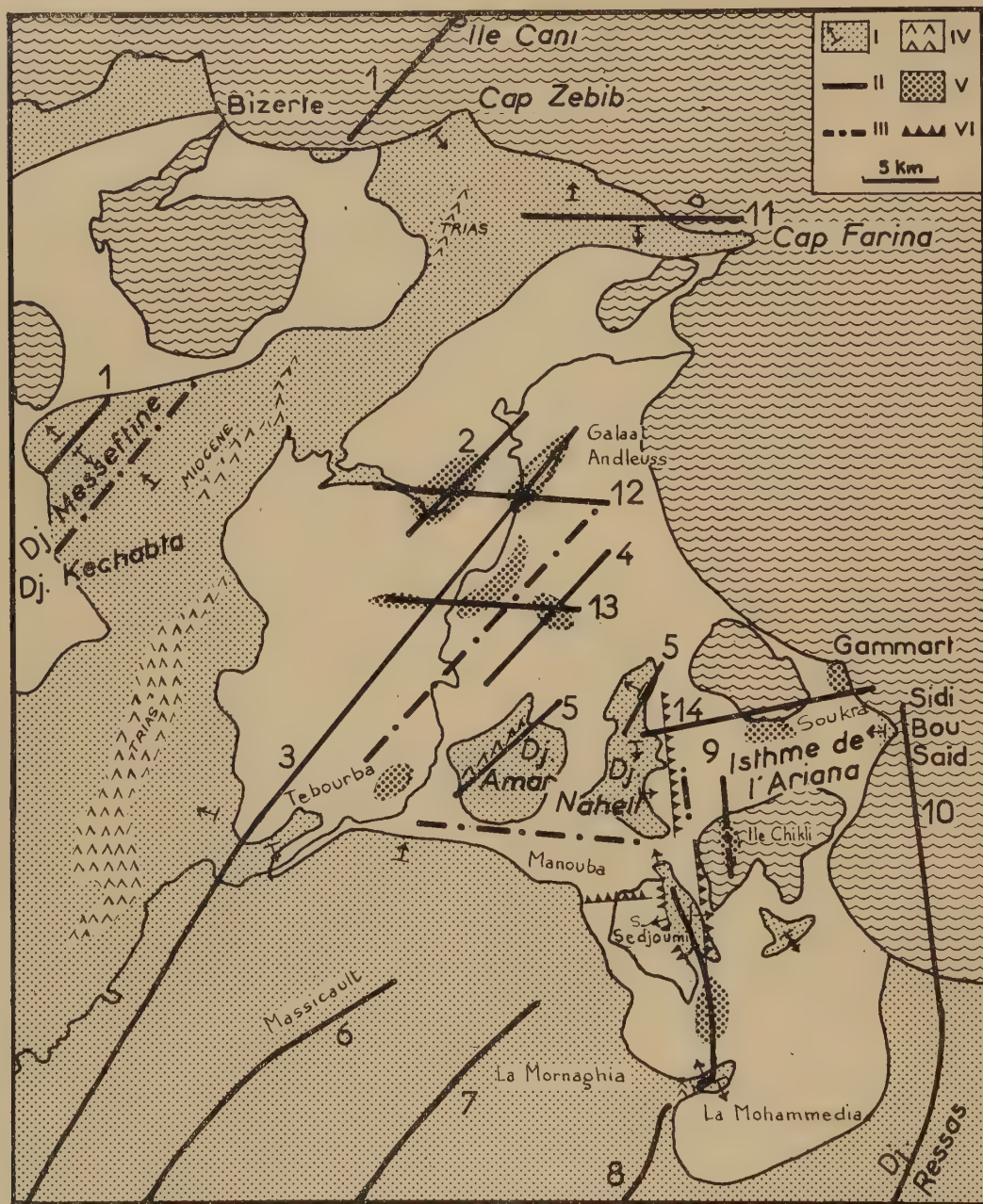


FIG. 44. — Carte tectonique.

I : massifs orographiques avec quelques pendages ; II : axes anticlinaux ; III : axes synclinaux ; IV : diapirs (Trias ou Miocène) ; V : aires des réactions anticlinales récentes et actuelles ; VI : failles récentes et actuelles.

mène permanent, auquel s'harmonisent même les mouvements subactuels. La façon dont les déplacements les plus récents s'intègrent aux directions atlasiques démontre la continuité de l'orogénèse quaternaire. Leur intérêt redouble du fait qu'ils poursuivent et accentuent la phase paroxysmale.

Les dômes en réaction anticlinale, qui se manifestent à travers la plaine fluviale aux intersections des axes atlasiques avec leurs transversales, ne sont pas sans équivalences dans le monde. On en trouve un exemple à une plus grande échelle dans la toundra de la Russie du Nord, drainée par la Petchora. Plusieurs affluents parallèles coulent dans la boucle de son confluent avec la Tsylma. V. V. Lamakin [1949] relate qu'ils suivent des synclinaux séparés par des anticlinaux en flexion récente. Pas plus que dans les dépendances de la Medjerda ces faits m'ont été découverts par l'observation des pendages, mais par des élévations de terrasses ou des irrégularités hydrographiques moins immédiatement perceptibles. Les cours d'eau traversent des vasières alternant avec des rapides ; les vasières correspondent à des synclinaux transverses, les rapides à des anticlinaux et les intersections anticlinales déterminent des dômes.

SUBSIDENCE. — De la continuité de l'orogénèse, il résulte que la subsidence quaternaire ne se distingue en rien de l'évolution tectonique et entraîne simplement le remplissage des sillons synclinaux directionnels au fur et à mesure de leur creusement. Elle se voit facilitée à Utique où l'alluvionnement fluvial suit la direction générale du plissement, mais il s'est créé à Tunis des bassins endoréiques retenus par des barrières partiellement effondrées, parce que l'écoulement s'est produit perpendiculairement aux axes synclinaux et anticlinaux.

L'affaissement entraîne l'apparition de pendages inclinés. Les sondages de la Manouba-Sedjoumi montrent cet aspect du phénomène. Le 6628 a recoupé les niveaux supérieurs du Mio-Quaternaire des collines avec un pendage accentué vers l'axe synclinal ; dans les carottes il était de 45° vers 160 m de profondeur. Les formations nouvellement sédimentées apparaissent concordantes, l'inclinaison s'atténuant toutefois progressivement. Par ailleurs, le voisinage de la Barrière de Tunis se traduit par un pendage des strates vers l'W dans cette cuvette synclinale subsidente. La dépression progresse vers la Barrière de Tunis à mesure que la flexure s'accuse.

La subsidence deltaïque de la Medjerda serait d'une interprétation plus facile, si elle n'avait pas servi auparavant de prétexte à des idées peut être trop complexes pour le cas présent. On sait que L. Glangeaud [1933] avait cherché à établir d'une manière générale une relation gravimétrique entre les bassins algériens bordés par des flexures récentes et leur infrastructure. C'est ainsi qu'il retrouve dans le synclinal de la Mitidja, essentiellement étudié par lui, des réajustements isostatiques post-tectoniques analogues à ceux qu'il a définis dans le Jura. De tels bassins correspondraient alors à une phase de relaxation postorogénique. G. Castany retrouve ces réajustements postorogéniques en Tunisie orientale, dans la région de sa thèse, mais il a voulu les étendre au delta de la Medjerda qu'il n'avait pas examiné en détail, et il a admis l'existence de trois soi-disant « fosses d'effondrement » à l'emplacement des plaines alluviales d'Utique, de la Manouba et de Tunis, où il s'agit seulement d'abaissements d'axes, sans noter la pérennité des phénomènes (voir notamment Castany [1952 b]).

Pour les bassins paraliques qui font l'objet de ce travail, des hypothèses isostatiques ont été émises malgré l'absence d'une couverture serrée de mesures gravimétriques. J. Lagrula [1951], astronome à l'observatoire d'Alger, dresse une carte de l'Algérie-Tunisie en procédant avec un pendule Holweg-Lejay et consacre cinq stations à la Basse-Medjerda. Il n'y a pas eu de prospection industrielle récente. Une campagne d'avant-guerre serait restée inédite, je n'ai pu en trouver trace.

Anomalies de Bouguer et d'Airey-Heiskanen calculées par Lagrula :

	B.	A. H.
Carthage	+ 24	+ 13
Tunis.	+ 30	+ 24

	B.	A. H.
Bizerte.....	+ 37	+ 17
Ras Et Aïne ¹	+ 34	+ 20
Medjez El Bab ²	+ 16	+ 23

Le réseau est trop lâche pour donner lieu à une tentative sérieuse d'interprétation. Les différences entre les valeurs sont faibles, mais ne signifient rien pour les structures locales car les cinq stations restent sur les bordures des soi-disant dépressions. J'avais espéré adjoindre une étude géophysique et demandé à Y. Gourinard de pressentir J. Lagrula. Quelques contingences l'ont écarté. En l'absence de gravimétrie pour en achever avec l'isostasie, nous admettrons avec A. Bersier [1948] que les réajustements sont synorogéniques ; la compression latérale, résultant de la poussée tangentielle, s'accompagnant « d'un rétablissement continu et concomitant de l'équilibre isostatique ».

A cause des envahissements marins cycliques les subsidences ne sont généralement pas considérées comme des phénomènes continus ainsi que semblent l'être les enfoncements synclinaux du delta de la Medjerda. Quand P. Pruvost [1930] a généralisé la notion de subsidence de J. D. Dana [1895], il supposait des discontinuités. Il a été suivi, A. Lombard [1953] parle de rythmes sédimentaires et A. Carozzi [1952] de sédimentation rythmique en liaison avec des pulsations tectoniques. C'est encore A. Bersier [1949] qui introduisit la notion de continuité en proposant les vagabondages du cours d'eau dans le haut delta comme motif de la différenciation des cyclothèmes, dans sa reconstitution des conditions de dépôt de la mollasse suisse, certainement très différentes de celles ayant présidé à la formation des bassins houillers ayant servi d'exemples à P. Pruvost. La région de Tunis rappelle celle décrite par A. Bersier, et nous avons déjà montré comment les facteurs géographiques suffisaient à eux seuls à expliquer les récurrences marines d'Utique. Car s'il a été nécessaire pour la clarté de l'exposé d'isoler stratigraphie, sédimentation et tectonique, dans la réalité les faits sont intimement liés. En détaillant la lithologie, A. Bersier trouve des érosions séparant les cyclothèmes ; à Utique nous avons vu les divagations de la Medjerda réduire à l'état de buttes témoins les cyclothèmes antérieurs en réaction anticlinale. Au cours de son ère *manoubienne*, où l'alluvionnement deltaïque a traversé les plissements en écharpe, les barrières anticlinales de Tunis et Chekli ont interdit les envahissements marins. Mais les écoulements endoréiques s'achèvent par des ombilics d'évaporation qui suffisent à distinguer des cyclothèmes, à vrai dire peu nets. La reconstitution de A. Bersier s'applique à l'origine à un bassin paralique inclus dans une orogénie intense, l'avant-fosse mollassique alpine. L'exemple nouveau des bassins paraliques ou subparaliques du delta de la Medjerda contribue à la définition tectonique et stratigraphique d'un style orogénique particulier, celui des *bassins paraliques synorogéniques*.

La différenciation en cyclothèmes dans une subsidence continue n'est pas spéciale à la Medjerda. On en trouve un exemple plus vaste avec le delta du Mississipi. Nous nous sommes déjà fait l'interprète de J. R. Russel [1936] expliquant comment la subsidence du géosynclinal de Gulf-Coast était insuffisamment compensée par l'alluvionnement, et comment les alternances marines et continentales provenaient des divagations de l'extrémité distale du promontoire deltaïque entre Vermilion Bay et Saint-Bernard, la mer envahissant chaque fois les parties trop éloignées de l'embouchure pour recevoir des apports solides. Mais la Medjerda ajoute quelque chose et surprend davantage, parce que les cycles se succèdent dans des sillons synclinaux étroits où la subsidence est entièrement compensée par la sédimentation et où les divagations de l'em-

1. Ras Et Aïne : localité située près du lac de l'Ichkeul.

2. Medjez El Bab : localité située sur l'anticlinal Tebourba-Galaat Andleuss à 30 km en amont de Tebourba.

bouchure ne devraient donc pas laisser d'endroits momentanément non recouverts de sédiments nouveaux, bien qu'en voie d'enfoncement. Il montre que les cyclothèmes peuvent se différencier dans une subsidence continue, même dans les circonstances apparemment les plus défavorables. L'évolution sédimentaire reconstituée par A. Bersier n'est cependant pas générale à tous les deltas, mais pour voir subordonner dans les circonstances actuelles les cyclothèmes à la tectonique, il est nécessaire de trouver une orogénie particulièrement active. Ce serait le cas du delta du Tigre et de l'Euphrate allongé dans le géosynclinal du golfe Persique, une des régions instables du globe. D'après G. M. Lees et N. L. Falcon il semble que les alluvions ne parviennent cette fois pas du tout à compenser l'enfoncement, et que les changements de rivages dépendent seulement des saccades tectoniques.

Depuis le début du Quaternaire deux subsidences continues synorogéniques se sont succédées dans notre région. Le complexe *manoubien* débute après l'inversion d'axes villafranchiens qui a fait émerger les bassins pliocènes et les a transformés en collines. Le complexe *utiquien* le remplace après que le glissement de terrain d'Oued Lill ait envoyé la Medjerda de Tunis à Utique. La translation évoque une de ces saccades de A. Bersier qui déforment la constante tangentielle et rythment l'orogénie en phases successives, en troublant la régularité des cyclothèmes. Il les subordonne à l'hétérogénéité lithologique, qui est remarquable ici où les blocs de calcaire ou de grès des « horst » interrompent les marnes gypseuses fluentes. Le Pliocène le plus redressé est précisément la mollasse de Porto Farina durcie par sa calcification en milieu réducteur.

Le déplacement de la subsidence accompagnant celui de la Medjerda pose un problème. Le glissement de terrain accidentel qui en semble l'origine a peut-être accompagné la réaction anticlinale et se rattacherait en définitive à la tectonique, mais il est difficile de ne pas voir une relation avec la surcharge alluvionnaire. Quand la Medjerda passe à Tunis, ses apports compensent la subsidence ; lorsqu'elle s'en détourne, la région se stabilise, à part l'abaissement de 20 m de la Sebkra Sedjoumi, et il ne se produit aucune invasion marine. Les flèches, fermant la lagune de Tunis sans apport fluvial, indiquent aussi la stabilisation. Au contraire, à partir de l'arrivée de la Medjerda dans les synclinaux d'Utique en repos depuis le Villafranchien, ceux-ci subissent un plissement rapide qui les creuse de 100 ou 200 m en 30 000 ou 40 000 ans.

Les observateurs du Quaternaire sont exposés à la tentation de trouver la cause de l'orogénèse dans l'alluvionnement. J. R. Russel voit de cette manière le creusement du géosynclinal de Gulf-Coast à l'embouchure du Mississipi. C'est un faux problème puisque les reliefs sont entourés par les surfaces d'appel sédimentaire et J. Bourcart lui donne une solution isostatique synthétique avec la théorie de la flexure continentale. En ce qui concerne plus strictement les grandes subsidences régionales, on admet, notamment d'après les observations sur les inlandsis, que l'enfoncement est provoqué pour les deux tiers ou les trois quarts par le poids du remplissage, pour le reste par les poussées.

Toutefois, il s'agit ici de très petits bassins, dont la charge à la fois faible et trop localisée ne paraît pas pouvoir provoquer une flexion de l'écorce terrestre ; dans les cas de ce genre, A. Bersier pense que les déformations sous l'effet de la contrainte tangentielle peuvent être déterminées et facilitées par l'application d'une très faible poussée verticale, telle que celle que produirait la charge d'une sédimentation commençante. Il compare même d'une façon pittoresque au « flambage » d'une plaque métallique. Donc ici les flexures verraient leurs emplacements guidés au cours de l'orogénèse par les variations, d'abord infimes, de la surcharge. Cela entraîne à nouveau, mais cette fois avec urgence, à supposer une plasticité anormale de la subsurface. La solution sera cherchée avec l'hypothèse régionale du décollement de l'Atlas tunisien. Mais sans négliger quand même le rôle des couches plastiques en profondeur, on peut admettre aussi dans une certaine mesure, et d'une manière peut-être plus synthétique, que c'est essentiellement le creusement

inexpliqué des synclinaux d'Utique qui a attiré la Medjerda de leur côté. Alors, au lieu d'être considéré comme la cause même du changement de vallée de la Medjerda, le glissement de terrain d'Oued Lil — qui a pu suivre un redressement des pendages du versant d'Utique — serait seulement pris pour un effet des déformations profondes, tout comme ce changement de vallée en somme. Aucune explication simple d'ailleurs ne saurait être satisfaisante, car plus on entre dans le détail des phénomènes, plus on voit de quelle façon complexe sont enchevêtrés les causes et les effets.

Pour achever, il faut retenir l'aspect synorogénique mis en évidence par les observations concernant les plissements subactuels. En deux mots, la subsidence fait la « montagne renversée » de Bersier.

SÉDIMENTATION SYNOROGÉNIQUE ET DISCORDANCES APPARENTES. —

Grâce à l'abaissement d'axes, la sédimentation synclinale se poursuit à mesure que la tectonique s'accuse et que les reliefs s'érodent. Cet aspect des subsidences synorogéniques anciennes échappe peut-être. Imaginons la sédimentation *manoubienne* interrompue par la Barrière de Tunis comme un étage stratigraphique, témoin d'une période révolue. On pourrait en schématiser la coupe ainsi que sur la fig. 45. La géologie classique verrait sans doute : un dépôt en *a* ; un plissement en *b* ; une érosion en *c*. Or, la montagne en *b* n'a jamais existé, les bassins ont toujours été isolés, et plissement, érosion et sédimentation font partie d'une évolution d'ensemble, qu'on ne doit pas diviser en stratigraphie et tectonique autrement que pour des commodités de raisonnement. Pour rétablir le processus réel, il serait nécessaire de s'attacher aux petites discordances accompagnant les failles et aux épaississements synclinaux et de supposer que ces boudinages n'ont pas toujours une origine tectonique.

Mais inversement l'observateur contemporain est porté à attribuer une valeur erronée aux discordances entourant les « horst », car le détail trop proche lui dissimule l'ensemble. Elles proviennent de deux causes, la lenteur du plissement et les hétérogénéités mécaniques de la lithologie.

Si le plissement est continu, imperceptible évidemment à l'échelle humaine, il est lent même devant les événements stratigraphiques qui le datent. Nous en voulons pour preuve l'anticlinal du Rmel. La fig. 1 de la Pl. III montre une discordance entre les pendages du Pliocène et le pendage du toit de la terrasse récente, mais celle-ci n'implique pas nécessairement une pulsation tectonique, elle peut provenir plus simplement d'un durcissement relativement rapide de la croûte cimentant cette terrasse après une émergence, au cours d'un plissement toujours continu mais lent. Comme on le comprend en détaillant la poche visible à gauche, remplie de galets roulés arrachés aux bancs pliocènes durcis, la falaise pliocène continuait à se courber sous la mer tyrrhénienne et s'érodait à mesure. La valeur de la discordance angulaire avec le Pliocène s'accroît progressivement depuis la surface d'érosion jusqu'à la surface d'émergence tyrrhénienne, cette dernière encroûtée. Le plissement continue régulièrement depuis le Pliocène et la succession stratigraphique, comme elle se présente ici, ne saurait servir de prétexte à le rythmer.

Des hétérogénéités lithologiques, accompagnant les extrusions anticlinales du bourrelet sédimentaire, déjà compacté, simulent aussi des discordances en bordure des sillons synclinaux encore plastiques. C'est ainsi que les « horst » crétacés des Djebel Amar et Naheli et éocènes de la Barrière de Tunis ont joué, en traversant des formations récentes moins inclinées, au cours de la phase orogénique plio-quadernaire. Quand celle-ci affecte seulement le cycle sédimentaire synorogénique, elle y entraîne les mêmes discordances apparentes, si des blocs plus rapidement durcis se disjoignent de leur enveloppe encore fluente. Il y en a un exemple à Galaat Andleuss. La faille de Galaat Andleuss affecte une dalle pliocène basculée à 80°, constituée par un grès calcaire très cimenté, épais de 20 à 25 m, d'un faciès exceptionnel dans cette région du delta pliocène. Cette

extrusion le long d'un anticlinal, qui traverse toute la région tunisoise, n'indique pas une phase tectonique restreinte à ce seul point, mais simplement un accident lié à l'existence de grès plus rigides, cimentés à cause de la sédimentation localement calcaire d'une petite lagune. Il s'agit donc d'un pli disharmonique dont la cause est purement mécanique, et la discordance apparente avec le Quaternaire ne permet pas de tirer une conclusion concernant l'âge du plissement ou de supposer un rythme dans la poussée.

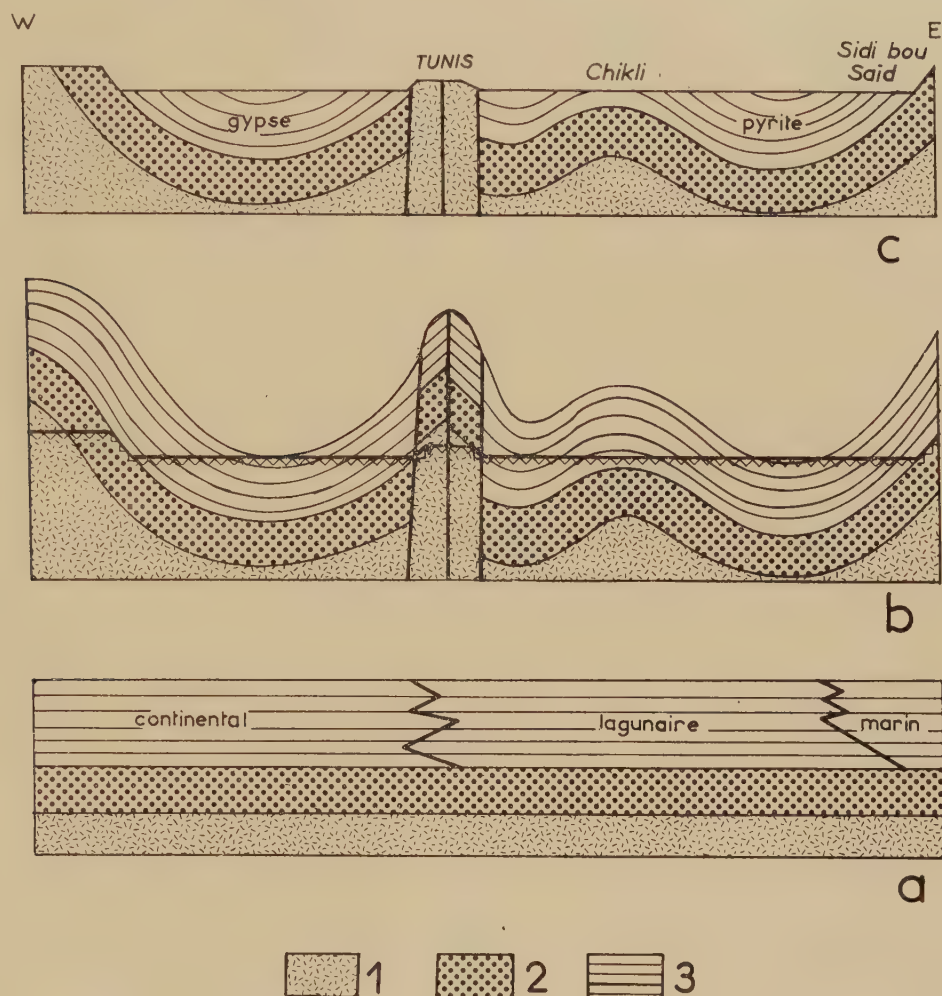


FIG. 45.

a : Période de dépôt; *b* : période de plissement; *c* : période d'érosion (selon la géologie classique).
1 : Éocène et anté-Éocène; 2 : Miocène et Oligocène; 3 : Quaternaire.

G. Castany [1953 a] a voulu étendre à toute la Tunisie la discordance anciennement constatée à Gafsa entre un cailloutis acheuléen durci par encroûtement, en position subverticale, et un sol encroûté lui aussi, peut être moustérien. Seulement à Gafsa, il ne s'agit plus d'un anticlinal mais d'une flexure et si le rajeunissement quaternaire est probable, il n'est pas certain; en effet le basculement de l'Acheuléen pourrait résulter d'un glissement de terrain en bordure d'une dépression causée par une flexure tectonique plus ancienne. Mais même en admettant un plissement quaternaire effectif, la discordance Acheuléen-Moustérien ne serait encore qu'une discordance apparente affectant un pli disharmonique, qui n'a pas plus de valeur à Gafsa qu'ailleurs, car les

cailloutis redressés ont été roulés dans un cône d'éboulis torrentiel, et ils forment par conséquent une plaque de surface restreinte, simplement disjointe comme la dalle de Galaat Andleuss.

INCIDENCES SUR LE RELIEF. COMPARAISON AVEC LA NÉOTECTONIQUE DE RUSSIE ET D'ASIÉ. — Dans la mesure où nous avons affaire à une région en cours d'évolution tectonique, les phénomènes géographiques, superficiels par essence, doivent être considérés sous un jour nouveau. Ils sont en quelque sorte « synorogéniques » eux aussi et conjuguent leur action à l'orogénèse en la modelant à mesure. Les Russes amenés à observer des plissements actuels sont familiarisés avec leurs effets. Leur néotectonique englobe avec l'orogénie les incidences orographiques. V. A. Obruchev [1936] écrit : « Nous avons assez de raisons de considérer le relief de la plus grande partie de la Sibérie comme un relief jeune, conditionné par les mouvements quaternaires de l'écorce terrestre », et pour lui la néotectonique s'applique à toute la surface de la terre.

Avec ses reliefs organisés par la tectonique, le bassin de la Medjerda est certes un exemple minuscule, mais dont les particularités rappellent curieusement celles observées dans l'Oural et en Sibérie. E. V. Iastrebov [1952] observe sur le versant oriental de l'Oural du Nord un plissement quaternaire marqué par le bombement d'une dalle de grès de 2 m d'épaisseur, courbée à 6 ou 8°, comme les croûtes du Sahel. Un monticule anticlinal de Paléocène continental recouvert de Quaternaire bombé, long de 200 m et haut de 18 à 20 m, traversant la plaine alluviale sibérienne, évoque Galaat Andleuss. E. P. Pokrass [1952] étend les observations de la Petchora aux territoires transouraliens. Le bassin inférieur de l'Ob de 2 ou 3 millions de km² est parcouru de dépressions synclinales et d'élévations anticlinales avec des blocs en surrection.

G. F. Mirtchine [1940] remarque que les méthodes occidentales pour comprendre l'extension des glaciations d'après les limites des moraines risquent d'être faussées, si la néotectonique a modifié plus ou moins profondément le réseau hydrographique. Il n'y a peut être pas encore en Afrique du Nord une doctrine qui envisage toutes les conséquences de la néotectonique, mais J. Dresch (soulèvement quaternaire de l'Atlas tellien [1950 a et b]) et R. Laffitte (flexure de Mostaganem [1942]) entre autres recourent aux plissements quaternaires pour justifier les irrégularités hydrographiques.

LE PLISSEMENT CONSIDÉRÉ COMME UN FAIT GÉOGRAPHIQUE. — La géologie a d'abord considéré les transformations tectoniques comme des phénomènes sans équivalences actuelles. Ce n'est pas sans répugnance qu'ont été comprises les observations qui les actualisaient de plus en plus. M. Dalloni ne voulait encore voir que des fractures dans le Villafranchien. L'orogénèse quaternaire n'est guère admise en Afrique du Nord que depuis 1925 ou 1930, sous l'influence de géologues comme L. Glangeaud et R. Laffitte. Mais, au contraire de ce qui se passe en Russie, on ne la conçoit pas comme une phase tectonique active, elle est qualifiée de tardive et, pour L. Glangeaud, n'est qu'un reliquat « postorogénique ».

Malgré ces restrictions, cette orogénèse n'est plus discutable, mais beaucoup éprouvent une difficulté à l'étendre jusqu'à l'époque présente. Et précisément en Tunisie, où G. Castany, arrêté parce qu'il supposait que les réajustements isostatiques sont postérieurs à l'établissement du relief, se bornait à concéder un raccourcissement de la période non plissée. Il profitait [1953 a] de la discordance constatée en 1911 à Gafsa pour distinguer entre une phase plissée qu'il admettait d'étendre jusqu'à l'Acheuléen et une phase dite « déformée » débutant avec un équivalent Tyrrhénien-Moustérien. Depuis que sont connus les travaux de A. Bersier, expliquant que les réajustements isostatiques peuvent être synorogéniques, une telle limitation ne se soutient plus guère. Et par ailleurs la discordance de Gafsa, analogue en définitive aux accidents de la région tunisoise, n'est très vraisemblablement qu'une disharmonie lithologique.

Les corrélations que nous avons établies entre un plissement, dont l'importance est démontrée par la puissance de la sédimentation synorogénique, et les phénomènes actuels qui l'accompagnent devraient amener à considérer les déformations tangentiellles comme des événements géographiques au même titre que l'érosion ou la capture d'un cours d'eau, mais plus délicate à observer parce que beaucoup plus lentes.

SISMICITÉ. — Deux sismographes enregistreurs sont installés sur la colline de Mio-Quaternaire au-dessus de la Kasba, à l'abri des vibrations parasites de l'agglomération urbaine, sur des bancs de grès qui leur donnent une assise. La station est surveillée par l'Institut de physique du globe de Strasbourg. Ils enregistrent notamment des secousses dont l'épicentre est dans la région. En 1950 une onde entretenue pendant quelques secondes a été ressentie par la population. Il n'est pas exclu que cette activité sismique ait quelque rapport avec le plissement.

HYPOTHÈSE DU DÉCOLLEMENT DE L'ATLAS TUNISIEN. — Si les plissements actuels ont amené plusieurs fois à évoquer des phénomènes géosynclinaux, cela ne veut pas dire qu'ils supposent nécessairement un géosynclinal ou bien un pli de fond atlasique tunisien. Au contraire, ils concordent si bien avec l'hypothèse de P. Bellair d'un décollement au niveau du Keuper gypso-salin, qu'il faut lui consacrer quelques lignes, bien entendu sans prétendre imposer un point de vue qui ne peut rester que théorique.

Récapitulons les observations qui supposent une plasticité anormale :

a) d'une manière générale, mobilité excessive de la subsurface : creusement du synclinal de la Manouba à angle trop aigu (profondeur supérieure à 600 m pour une ouverture de 4 km). Rapidité anormale des mouvements d'Utique (un cycle en 5 000 ans, une subsidence de 100 ou 200 m ajoutée à un soulèvement anticlinal égal ou supérieur à 60 m, en 30 000 ou 40 000 ans).

b) les pendages quaternaires accentués indiquent des petits rayons de courbure et ne traduisent pas l'importance du plissement mais seulement sa facilité.

c) l'inversion d'axes est classique. A Oran, Y. Gourinard décrit l'*inversion des puissances* entre Secondaire et Néogène, mais il est exceptionnel de la trouver entre Villafranchien et Quaternaire récent avec un Pliocène redressé épais de 800 m.

d) les extrusions anticlinales pointent comme des dômes de sel.

e) sensibilité paradoxale à la pesanteur. La translation d'une surcharge minime déplace parallèlement les aires en activité orogénique.

Si les données gravimétriques actuelles ne permettent pas d'intéresser l'infrastructure aux petits réajustements, les cartes donnent la physionomie d'ensemble. Particulièrement celle de B. J. Hofman [1952] qui complète J. Lagrula avec des mesures en mer. Il semble que la Tunisie du Nord et le détroit de Sicile correspondent à un socle stable à l'extrémité du bâti déformé par les plis de fond atlasique, limité à l'E à partir du golfe de Gabès par une anomalie gravimétrique négative NE-SW, la flexure étant jalonnée d'ailleurs avec le volcan de l'île Pantellaria.

P. Bellair [1950-1951] rapproche le désordre des plis de Basse-Provence des diapirs de Tunisie et suppose un décollement, achevé en Basse-Provence, en cours en Tunisie, facilité par les caractères mécaniques d'un Keuper primitivement très développé. Il définit ainsi des « chaînes de socle » isolées d'une infrastructure non différenciée, par opposition aux chaînes géosynclinales. Il s'attache surtout à la solubilité de ces formations et suppose que l'alluvionnement des zones de subsidence de Tunisie compense les dissolutions. Les déformations que nous avons observées s'accordent bien avec une telle infrastructure en raison de la mobilité de celle-ci. Si une théorie n'intéresse que par ses conséquences, « l'hypothèse de travail » suggéré par P. Bellair supprime ici les difficultés d'interprétation de la tectonique plio-quaternaire.

Il n'y a peut-être pas lieu de restreindre ces propriétés au Keuper, car différents épisodes sédimentaires lagunaires sont doués des mêmes caractères mécaniques. Le Miocène du Kechabta présente une différenciation salifère diapirique si nette qu'elle a été confondue avec du Keuper. Burollet [1951] en rétablit l'âge.

Les observations semblent montrer en outre que la surface correspondante à l'infrastructure stable paraît restreinte relativement à l'alluvionnement important qui s'y déverse. Les barrières de Tunis et de Chekli rebroussées par le changement de direction atlasique au voisinage du golfe de Tunis, qui traversent les vallées synclinales par lesquelles s'écoulent les alluvions fluviales, paraissent s'enfoncer et s'écarter sous la marée montante des apports. Les diapirs de Tebourba à Porto Farina compensent les abaissements d'axes. Les séries subsidentes pliocènes se soulèvent pour laisser place à la subsidence quaternaire. A l'extrémité des orogénèses atlasiques, cette région simplement décollée subit la même poussée tangentielle et reçoit d'autre part les alluvions provenant de leur érosion. Elle paraît limitée à l'E. Le poids de ce matériel sédimentaire accumulé ne peut que favoriser les déplacements tectoniques.

Le caractère synorogénique, que nous avons attribué à la sédimentation accompagnant le décollement dans sa dernière phase, permet de compléter la physionomie de l'Atlas tunisien telle que la voit P. Bellair. Il est formé de « horst » isolés à travers la plaine alluviale. Inspiré par P. Fourmarier [1922], L. Calémbert [1939, 1941 a et b] a montré que ceux qu'il avait étudiés correspondent chaque fois à une sédimentation lenticulaire. G. Castany [1951] essaye pour sa thèse de les réunir dans un ensemble, mais ses études détaillées traduisent surtout leur hétérogénéité. Les phases tectoniques déterminées par lui [1952 b] sont jurassiques, crétacées, éocènes, oligocènes, miocènes, c'est-à-dire qu'elles paraissent toujours accompagner une sédimentation synorogénique dont le matériel proviendrait de l'Atlas des plis de fond (la granulométrie fine s'accorde avec ce transport). Comme les alluvions amenées actuellement des montagnes algériennes par la Medjerda, la sédimentation secondaire et tertiaire se serait déposée en remplissant successivement de petits bassins synclinaux séparés en subsidence, donnant ainsi naissance à ces massifs lenticulaires. De ces conditions particulières de dépôt résulteraient les brèches locales, les variations de faciès et notamment la fréquence des formations lagunaires. Si la tectonique tunisienne est si compliquée dans le détail, c'est sans doute alors parce que les disharmonies synorogéniques se seraient exagérées avec la reprise ultérieure des plissements, bousculant de plus en plus les dalles incompetentes.

En définitive, la phase quaternaire qui modèle la sédimentation synorogénique de la Medjerda ne paraît guère destinée à transformer l'Atlas. Elle créera quelques nouveaux « horst » lenticulaires qui prendront place parmi les précédents, mais, de même que les phases antérieures, elle n'a qu'un avenir orographique limité. L'accentuation des pendages, l'épaisseur subsidente ne traduisent pas l'ampleur orogénique, mais la faible superficie des bassins.

Le morcellement éventuel des lagunes risque d'avoir des répercussions économiques. En effet, un programme étoffé de recherches pétrolifères est justifié en partie par l'importance des faciès lagunaires, tels que les reconstitue la paléogéographie rudimentaire qui réunit les affleurements en une couche unique. Mais s'il s'agit de petits bassins de subsidences isolés dans un domaine continental qui les ramène en profondeur à l'aérobiose, leur intérêt disparaît. Jusqu'à présent les forages ont confirmé cette manière de voir, en ne justifiant pas les espérances que l'on aurait pu fonder sur l'existence non vérifiée de grandes structures.

RÉSULTATS GÉNÉRAUX

POSITION STRATIGRAPHIQUE DE LA SÉRIE ÉTUDIÉE. — Le cycle pliocène ¹, au cours duquel la Medjerda a construit son ancien delta de Porto Farina, se prolonge par une phase régressive accentuée au Villafranchien, lorsque le golfe se resserre entre ses rives actuelles. Simultanément l'embouchure est déplacée vers Tunis, d'où elle migrera ultérieurement en direction d'Utique. La série régressive correspondante n'est que légèrement perturbée par une séquence rythmique, que l'on peut peut-être assimiler au soi-disant « Tyrrhénien ».

ÉVÉNEMENTS	BASSINS DE SÉDIMENTATION	PLISSEMENTS	ÉCHELLE STRATIGRAPHIQUE
Barrage d'Oued Lil et fermeture de la vallée de Tunis	Cycles deltaïques à Utique (unité utiquienne)	Anticlinaux et synclinaux de la plaine d'Utique	50 000 ans MOUSTÉRIEN Faune chaude à <i>S. bubonius</i> ACHEULÉEN CHELLÉEN Transgression thyrrhénienne Faune froide à <i>C. islandica</i>
Régression réunissant à la côte l'île de Carthage	Sédimentation estuarienne à Tunis, fluviale à la Manouba (unité manoubienne)	Horst des Djebel Amar et Naheli	
Transgression jusqu'à la plage de Tunis		Barrières de Tunis et de Chekli	
Fermeture du golfe de Kechabta		Synclinal de la Manouba	
Effondrement du golfe de Tunis	Pliocène marin à Porto Farina, lagunaire à Gammar, fluviale en amont	Inversion d'axes à Porto Farina	CALABRIEN
Transgression au début du Pliocène		Anticlinaux de la côte au NE de Bizerte	VILLA-FRANCHIEN
		Synclinal de Porto Farina	PLIOCÈNE

TABL. 15. — Histoire géologique du delta de la Medjerda.

Les terrasses sont déformées par des mouvements récents qui se poursuivent à l'heure présente, et leur faune ne se distingue pas de la faune actuelle. Pour suivre une histoire géologique

1. Pour éviter toute confusion, précisons que le mot *cycle* sert à définir deux phénomènes différents. Il n'y a pas de commune mesure entre ce cycle stratigraphique, eustatique, et les incidents cycliques dont la plaine d'Utique se trouve le théâtre.

continue dans laquelle tout découpage ne serait qu'un artifice, j'ai cru devoir éviter la terminologie habituelle du Quaternaire et je m'en suis tenu aux termes locaux que j'ai créés : *Utiquien* et *Manoubien*. Le tableau 15 rapproche les événements observés de l'échelle stratigraphique adoptée par M. P. Pruvost (cours en Sorbonne 1951-1953). En fait, rien n'interrompt le cycle stratigraphique qui débute avec la transgression eustatique pliocène, et dans la région étudiée il n'y a pas de raisons d'y introduire le début d'une nouvelle ère, ni même un étage. On y vit encore la régression pliocène et l'on pourrait dire que la notion de Quaternaire n'y a jusqu'ici aucun sens, tout au moins du point de vue purement stratigraphique.

Mais le Quaternaire entend encore l'apparition de l'homme. C'est une notion susceptible d'extension. Pour ceux qui veulent voir débiter au cours du Pliocène une *ère anthropomorphe* marquée par des actions humaines dont les répercussions sont plus profondes qu'il ne pourrait sembler, notamment en ce qui concerne la biosphère, signalons que les grands travaux entrepris dans le cours inférieur de la Medjerda, s'ils sont poursuivis jusqu'à leur accomplissement, supprimeront les cycles deltaïques et par suite l'aspect cyclothématique de la subsidence utiquienne, en risquant même de transporter celle-ci vers le S, direction dans laquelle serait rejeté le débit solide du fleuve. En Camargue, quand M^{me} Duboul-Razavet [1949 c] observe que la création des rizières du Vaccarès a provoqué une érosion notable du rivage des étangs, en retenant le débit solide qui s'y écoulait auparavant, elle a noté un fait du même genre. Dans bien d'autres circonstances, il y a des exemples d'évolutions entraînées par des cultures, élevages ou industries humaines; des aménagements comme ceux de la vallée du Tennessee, encore, sont capables de modifier le climat d'une manière non envisagée. Il apparaît que la surface du globe se comporte comme un milieu doué d'une certaine sensibilité, où l'on commence à deviner que des atteintes minimes peuvent avoir des résonances difficilement concevables, et il est logique de voir la géologie s'en inquiéter. Dans ce domaine, comme dans celui plus classique des œuvres d'art et de l'hydrogéologie, il est peut-être souhaitable de ne pas négliger ses indications.

L'expérience du cycle pliocène est susceptible d'intéresser en un certain sens la chronologie des périodes antérieures. Indépendamment des procédés radioactifs de mesure du temps, on a trop coutume de voir un rapport entre ce dernier et l'épaisseur stratigraphique, ce qui est en somme très arbitraire, car la puissance d'un horizon dépend du volume d'apport alluvial et de la superficie du bassin tout autant que de la durée. Et même, peut-être un peu paradoxalement, ne doit-on pas considérer la sédimentation comme un accident, au même titre que la fossilisation, interrompant une stabilité sans témoignage qui serait l'état normal. C'est qu'il est en effet frappant de penser au bassin d'Utique longtemps immobile, du début du Villafranchien à la fin du Moustérien, et dont la subsidence reprend brutalement, comme une saccade. La présence en profondeur à Utique de couches salifères rendrait perceptible, en l'accélérant, une évolution qui échappe ailleurs.

MÉTHODES ET FAITS NOUVEAUX. — Avant d'énumérer les résultats nouveaux de ce travail, je mentionnerai, parmi les techniques d'étude essentiellement variées auxquelles j'ai eu recours, celles qui sont rarement mises à contribution de manière systématique en pétrographie sédimentaire : l'examen de la couverture photographique aérienne, ainsi que l'utilisation des données de la météorologie physique (qui m'ont permis de montrer qu'en Afrique du Nord une hygrométrie élevée ne contrariait pas forcément l'évaporation au sol); et dans un autre ordre d'idées l'application de la paléocéologie des Mollusques à la détermination des faciès de sédimentation. Il faut ajouter les renseignements apportés par les prospections hydrologiques, auxquels je me suis souvent référé (dont l'interprétation est rendue plus facile, en certain cas, par l'emploi du diagramme que j'ai mis au point pour dresser la carte chimique des eaux souterraines).

Je distinguerai entre les faits nouveaux ceux qui permettent seulement une meilleure connaissance de la région de Tunis, de ceux qui ont une signification plus générale.

1. LES BASSINS PARALIQUES DES ENVIRONS DE TUNIS. — J'ai confirmé l'importance en Tunisie de la géologie des périodes très récentes, en établissant une liaison entre les phénomènes actuels observés à l'entour du promontoire deltaïque de la Medjerda, les déplacements récents du littoral

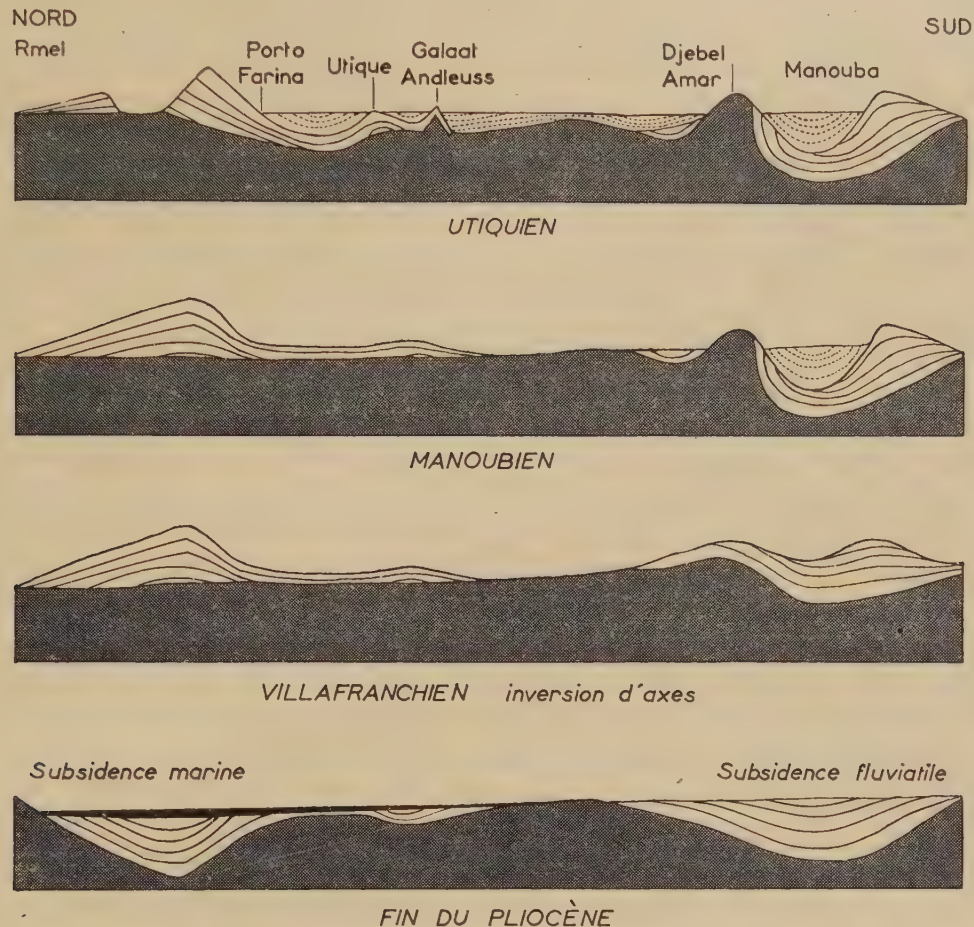


FIG 46. — Schéma de la translation des aires en subsidences.

Remarque : les hauteurs sont exagérées, $\times 6$ env.,
et les phénomènes n'intéressent en réalité qu'une pellicule plus mince de l'écorce terrestre.

et de l'embouchure, et les cycles évolutifs qui ont accompagné la subsidence de la région. Un des buts essentiels de ce travail est de prouver qu'à partir du Villafranchien jusqu'à la fin du Moustérien (approximativement) la Medjerda empruntait la vallée de Tunis ; il en résulte que les alluvions de ce fleuve auraient rempli successivement trois bassins différents au cours du cycle pliocène actuel : Porto Farina, Tunis-la Manouba, Utique. L'étude stratigraphique du bassin pliocène de Porto Farina m'a d'ailleurs permis de signaler un faciès deltaïque exceptionnel du Pliocène méditerranéen et semble indiquer en outre que l'actuel golfe de Tunis n'existe que depuis le Villafranchien.

En ce qui concerne l'orogénie, j'ai pu montrer que chacun de ces changements de vallée s'est accompagné d'une migration parallèle des aires en subsidence. Ayant découvert par ailleurs de nouveaux exemples de plissements anticlinaux très jeunes, dont celui de Galaat Andleuss, qui

présente l'intérêt particulier de fournir pour la première fois en Afrique du Nord une donnée rapportée à la chronologie non plus seulement géologique mais historique, j'ai pu conclure que le cycle stratigraphique étudié était synorogénique, bien que les plis soient parfois disharmoniques. Conformément enfin à une hypothèse de P. Bellair, j'ai indiqué que les couches salifères jouaient sans doute un rôle tectonique important en Tunisie et en particulier dans cette évolution récente.

2. GÉOLOGIE SÉDIMENTAIRE. — D'après des prélèvements effectués dans la Medjerda en crue, je me suis aperçu que les lois de l'évolution granulométrique découvertes par A. Rivière s'appliquaient aussi aux répartitions granulométriques instantanées en cours de transport, apportant une nouvelle confirmation aux déductions établies à partir des sédiments en place. Dans la lagune de Tunis, où les matières organiques permettent la défloculation partielle d'argiles alluviales kaolino-illitiques, j'ai mis en évidence une décantation conduisant à une fonction hyperbolique, état d'évolution exceptionnel et non signalé auparavant en milieu marin. Comme j'ai plusieurs fois déterminé des faciès granulométriques d'après des carottes de sondage, je pense que la présence de sédiments plus décantés au centre des bassins lagunaires serait susceptible de faciliter les prospections pétrolifères quand il n'y a pas eu de migrations, en permettant d'identifier les régions centrales des lagunes de genèse, où les chances d'anaérobiose sont plus grandes. Près du rivage de Tunis, j'ai montré en effet que l'anaérobiose était contrariée par l'arrivée des eaux souterraines.

Dans la lagune de Tunis, j'ai suivi en outre la diagénèse de la pyrite à partir du fer contenu dans les matières organiques des vases, qui évolue en milieu réducteur vers des hydrates de sulfure de fer, tandis qu'il se forme au contraire des oxydes lorsque les venues d'eaux continentales ou marines introduisent de l'oxygène dissous. Au faciès lagunaire et calcaire du lac, j'ai opposé un faciès continental gypseux, dans lequel j'ai pu préciser le mécanisme des migrations salines ; si bien qu'en supposant que la lagune de Tunis soit le milieu de genèse de formations plus ou moins voisines de celles du Keuper, la présence de sels solubles et de couches colorées en rouge par les oxydes de fer résulterait dans ce cas d'infiltration d'eaux continentales.

Enfin, à l'opposé des principes les plus classiques de l'hydrogéologie, j'ai découvert que les séries argileuses ou marneuses ne pouvaient que rarement servir d'écrans imperméables, mais qu'elles avaient au contraire un rôle aussi important qu'imprévu en tant que roches réservoirs, montrant que l'alimentation d'une couche aquifère n'est pas limitée à la zone d'infiltration. Ce fait me paraît pouvoir simplifier de façon notable tous les problèmes concernant la prospection et le captage des eaux du sous-sol.

BIBLIOGRAPHIE ¹

- AGAFONOFF V. (1935). — Sols types de Tunisie. *Ann. Serv. botan. Tunisie*, t. 12-13.
- ALLEMAND-MARTIN A. (1909). — Aperçu sur la structure géologique de la péninsule du cap Bon. *C. R. Ac. Sc.* t. 149, p. 489-491.
- (1923). — Le Pliocène de la péninsule du cap Bon. *Ibid.*, t. 176, p. 1173-1175.
- ARAMBOURG C. (1949). — Les gisements de Vertébrés villafranchiens de l'Afrique du Nord. *B. S. G. F.*, (5), XIX, p. 195-204.
- (1952). — La faune à *Hipparion* de Bou Anifia (Oran), sa situation stratigraphique. *C. R. 19^e sess. Congr. géol. intern. Alger*, A. S. G. A., fasc. XXI, p. 396.
- ARAMBOURG C. et ARNOULD M. (1949). — Note sur les fouilles paléontologiques exécutées en 1947, 1948 et 1949 dans le gisement villafranchien de la Garaet Ichkeul. *Bull. Soc. Sc. nat. Tunisie*, t. 2, p. 150-157.
- ARCHAMBAULT J. (1947). — Hydrogéologie tunisienne. *Ann. Mines et Géol.*, Tunis, n° 1.
- ARNOULD M. (1948). — Présence du Quaternaire marin à Tunis. *Bull. Soc. Sc. nat. Tunisie*, t. 1, p. 30-31.
- (1949). — Mouvements épirogéniques récents en Tunisie. *C. R. somm. S. G. F.*, p. 202-204.
- (1952). — Preuves paléontologiques de l'inexistence du Sahélien aux environs de Bizerte. *C. R. 19^e sess. Congr. géol. intern. Alger*, sect. XIII, fasc. XV, p. 29-34.
- AUDOLLENT A. (1901). — Carthage romaine. 146 avant Jésus-Christ, 698 après Jésus-Christ (app. I : textes anciens relatifs à la topographie de Carthage romaine ; app. II : textes du moyen âge et des temps modernes jusqu'en 1883, relatifs aux ruines de Carthage). Paris, A. Fontemoing.
- BAARS (1931). — Over sulfart reductie door bacterien. Thèse, Delft.
- BARJOT P. (1952). — Le golfe d'Utique dans l'antiquité, le destin d'Utique, de Carthage et de Bizerte, suivi d'une « Note sur la chronologie des remblayages de la Medjerda et comblement du golfe d'Utique dans l'antiquité ». *Rev. gén. Hydraulique*, n° 68.
- BÉDÉ P. (1948). — Note sur une faunule quaternaire provenant de sondages à El Aouina et El Ariana. *Bull. Soc. Sc. nat. Tunisie*, t. 1, p. 37-53.
- BELLAIR P. (1950). — Traces de phénomènes diapirs anciens en Basse-Provence. *Bull. Soc. Hist. nat. Toulouse*, t. 85, p. 214-215.
- (1951). — Quelques réflexions sur les chaînes continentales. *70^e Congr. A. F. A. S.*, Tunis, vol. 1, p. 106-107.
- BELLAIR-BAUDIER R. et BELLAIR P. (1951). — La lagune de Porto-Farina, un cas intéressant de colmatage côtier. *Ibid.*, vol. I, p. 149-151.
- BEIJERINCK (1895). — Le *Spirillum desulfuricans* comme agent de la réduction des sulfates. *Arch. Neerl.*, t. 29, n° 233.
- BERKALOFF E. et CABASSO (1940). — Sur une souche de vibron réducteur des sulfates isolée de l'eau d'un puits artésien en Tunisie. *Arch. Inst. Pasteur Tunis*, t. 29, fasc. 2 et 4, p. 262-284.
- BERKALOFF E. et MENARD P. (1940). — Corrosion biologique dans les puits artésiens en Tunisie. *Ibid.*, t. 29, fasc. 4.
- BERNARD A. (1937). — Afrique septentrionale et occidentale. In *Géographie universelle*, coll. P. VIDAL DE LA BLACHE et L. GALLOIS, t. 11, 1^{re} partie. Paris, Armand Colin.
- BERNARD (capitaine) (1912). — Le golfe d'Utique et les boucles de la Medjerda. *Bull. Géogr. hist. et descr.*

1. Pour les publications en langue russe, j'ai mentionné les noms des auteurs des traductions inédites dont j'ai disposé, M^{lles} R. FRIDMAN ou S. KETCHIAN, à qui j'adresse des remerciements. Je rappelle que cette bibliographie a été arrêtée en 1954.

- BERSIER A. (1948). — Les sédimentations rythmiques synorogéniques dans l'avant-fosse mollassique alpine. *Rep. 18th sess. intern. geol. Congr., Gr.-Brit.*, p. iv, p. 83-93.
- (1949). — La sédimentation cyclique de type mollassique paralique en fonction de la subsidence continue. *In Sédimentation et Quaternaire*, p. 9-15, Bordeaux, Led-Sam.
- (1952). — Les sédimentations cyclothématiques des fosses paraliques de subsidence. *C. R. 19^e sess. Congr. géol. intern. Alger*, sect. XIII, fasc. XIV, p. 81-83.
- BOLZE J. (1950). — Diapirs triasiques et phases orogéniques dans les monts de TebourSouk. *C. R. Ac. Sc.*, t. 231, p. 480-482.
- BONNET A. et DUBOUL-RAZAVET C. (1952). — Contribution à la connaissance du Pliocène du Bas-Rhône. *B. S. G. F.*, (6), II, p. 123-130.
- BOURCART J. (1949 a). — Nouvelles observations sur le Quaternaire du littoral marocain entre Casablanca et Safi. *Ibid.*, (5), XIX, p. 435-465.
- (1949 b). — La théorie de la flexure continentale. *C. R. XVI^e Congr. intern. Géogr.*, Lisbonne, p. 167-190.
- (1952 a). — Nouvelle défense de la théorie de la flexure continentale. *C. R. 19^e sess. Congr. géol. intern. Alger*, sect. XIII, fasc. XIV, p. 57-69.
- (1952 b). — Sur le Quaternaire marin de Mazagan à Mogador et sur la non-existence de l'étage ouljien. *B. S. G. F.*, (6), II, p. 441-452.
- BOURCART J. et FRANCIS-BŒUF Cl. (1942). — La vase. Paris, Hermann et Cie, Act. scient. et ind.
- BOURCART J. et RICOUR J. (1952 a). — Une hypothèse sur les conditions de sédimentation des niveaux salifères du Trias. *C. R. somm. S. G. F.*, p. 37-38.
- (1952 b). — Une hypothèse sur les conditions de sédimentation des niveaux salifères du Trias. *C. R. 19^e sess. Congr. géol. intern. Alger*, sect. XIII, fasc. XIII, p. 35-47.
- BRONGERSMA-SANDERS M. (1944). — Een H₂S bevattend sediment met een hoog organisch gehalte uit open zee. *Geol. en Mijnb.*, vol. 6, n° 1.
- (1945). — The annual fish mortality near Walvis Bay (South West Africa), and its significance for paleontology. *Arch. Neerl. Zool.*, vol. 7, n°s 1-2.
- (1947). — On the desirability of a research into certain phenomena in the region of upwelling water along the coast of South West Africa. *Proc. k. Nederl. Ak. Wetensch.*, vol. L, p. 659-665.
- (1948). — The importance of upwelling water to vertebrate paleontology and oil geology. *Verh. k. Nederl. Ak. Wetensch., Afd. Natuurk.*, 2^e sect., D. XLV, n° 4.
- BRUJEWICZ S. W. et VINOGRADOVA E. (1946). — General features of sedimentation in the Caspian sea (according to the distribution of carbonates, Fe, Mn and P in sea deposits). *C. R. Ac. Sc. U. R. S. S.*, t. 52, p. 789-792.
- BUCKINGHAM (1907). — Studies of the movement of soil moisture. *U. S. Bur. Soil, Bull.* 38.
- BUISSON M. (1934). — L'étude des fondations. 1 : État actuel des connaissances ; 2 : Caractéristiques physiques et mécaniques des sols. *Science et Industrie (Travaux)*, avr., p. 142-153 ; mai, p. 195-203 ; juil., p. 285-294 ; août, p. 339-348 ; nov., p. 497-505 ; déc., p. 542-548.
- BUROLLET P. F. (1951). — Étude géologique des bassins mio-pliocènes du Nord-Est de la Tunisie. *Ann. Mines Géol.*, Tunis, n° 7.
- CALEMBERT L. (1939). — Précisions sur la géologie du Djebel Trozza (Tunisie centrale). *63^e Congr. A. F. A. S.*, Liège, p. 461-464.
- (1941 a). — Essai sur le géomorphisme de certains massifs à ossature calcaire en rapport avec leur évolution tectonique. *Ann. Soc. géol. Belgique*, t. 64, p. M. 3-39.
- (1941 b). — Recherches sur le rôle des masses calcaires dans la tectonique de l'Atlas algéro-tunisien. *Mém. Ac. r. Sc. et Let. Belgique*, t. 12, fasc. 5.
- CALVET M. (1951). — Notes sur les origines du port de Tunis. *70^e Congr. A. F. A. S.*, Tunis, vol. I, p. 222-236.
- CAROZZI A. (1952). — Méthode d'analyse de la sédimentation rythmique. *C. R. 19^e sess. Congr. géol. intern. Alger*, sect. XIII, fasc. XIV, p. 71-80.
- CASTANY G. (1948). — Les fosses d'effondrement en Tunisie. Géologie et hydrologie. *Ann. Mines et Géol.*, Tunis, n° 3.
- (1949). — Phénomènes de subsidence plio-quaternaire en Tunisie. *Bull. Soc. Sc. nat. Tunisie*, t. 2, p. 4-11.

- (1951). — Étude géologique de l'Atlas tunisien oriental. Thèse. *Ann. Mines et Géol.*, Tunis, n° 8.
- (1952 a). — Le Jurassique du Djebel Bou Kornine d'Hammam-Lif. *Bull. Soc. Sc. nat. Tunisie*, t. 5, p. 195-204.
- (1952 b). — Tectonique, paléogéographie et orogénèse de la Tunisie. *XIX^e Congr. géol. intern. Alger, Monogr. région.*, sér. 2, n° 1.
- (1953 a). — Paléogéographie du Quaternaire de Tunisie. *C. R. somm. S. G. F.*, p. 155-157.
- (1953 b). — Carte géologique de la Tunisie au 500 000^e (2^e éd.). Notice explicative. Tunis, Dir. trav. publics.
- CASTANY G. et DOMERGUE Ch. (1947). — Le problème des chotts tunisiens. *C. R. somm. S. G. F.*, p. 166-167.
- CHOUBERT G. (1948). — Au sujet des croûtes calcaires quaternaires. *C. R. Ac. Sc.*, t. 226, p. 1630-1631.
- CHOUBERT G. et BRYSSINE G. (1946). — Sur les formations continentales du Quaternaire marocain. *Ibid.*, t. 223, p. 863-865.
- CHOUBERT G. et LAVOCAT R. (1950). — Déformations et plis de la Hammada du Dra. *Ibid.*, t. 231, p. 451-453.
- CIZANCOURT H. DE (1931). — La question des eaux dans les gisements de pétrole. *Ann. Off. nat. Comb. liq.*, n° 2, p. 195-224 ; n° 5, p. 875-909.
- CLASSEN Th. (1930). — Périodisches Fischsterben in Walvis Bay, South West Africa. *Palaeobiologica*, Bd 3.
- DALLA VALLE J. M. (1943). — Micromeritics, the technology of fine particles. New York, Pitman.
- DALLONI M. (1915). — Recherches sur la période néogène dans l'Algérie occidentale. *B. S. G. F.*, (4), XV, p. 428-457.
- (1949). — Basse plage marine quaternaire et formations continentales récentes à l'Ouest d'Alger. *Bull. Soc. Hist. nat. Afr. Nord*, t. 40, p. 20-26.
- DANA J. D. (1895). — *Manual of Geology*. New York.
- DEMOLON A. (1952). — *Dynamique du sol*, 5^e éd. Paris, Dunod.
- DENISSOV N. J. (1946). — Reduction in porosity of clay rocks during consolidation and its geological importance. *C. R. Ac. Sc. U. R. S. S.*, t. 53, p. 451-454.
- (1948). — Sur la différenciation mécanique des sédiments argileux. *Izv. Ak. Nauk SSSR (géol.)*, n° 1, p. 147 (en russe, trad. R. FRIDMAN).
- DIXEY F. (1931). — *Practical handbook of water supply*. London, Thomas Murby.
- DOHM C. F. (1936). — Petrography of two Mississippi river subdeltas. In « Lower Mississippi river delta ». *Louisiana geol. Surv., geol. Bull.*, n° 8, p. 339-383.
- DRESCH J. (1950 a). — Sur le rôle des mouvements post-pliocènes et des changements de climat dans la formation du réseau hydrographique de la région de Constantine. *C. R. Ac. Sc.*, t. 230, p. 853-855.
- (1950 b). — La formation du réseau hydrographique de la région de Sétif et les mouvements post-pliocènes. *Ibid.*, t. 230, p. 986-988.
- DUBOUL-RAZAVET C. (1949 a). — L'évolution actuelle du delta du Rhône, phénomènes généraux. *Ibid.*, t. 228, p. 1238-1239.
- (1949 b). — Évolution générale de la pointe de Beauduc. *Ibid.*, t. 229, p. 1082-1084.
- (1949 c). — L'évolution actuelle du Vaccarès. *Ibid.*, t. 229, p. 1244-1245.
- (1951 a). — Sur le littoral ouest de la pointe de Beauduc (delta du Rhône). *Ibid.*, t. 232, p. 2030-2031.
- (1951 b). — L'évolution lagunaire en Camargue. *Ibid.*, t. 233, p. 264-265.
- (1951 c). — Delta du Rhône. Promontoire deltaïque du Grand Rhône. *Proc. 3th intern. Congr. Sedimentol.*, Groningen, p. 99-107.
- DURAND J. (1949). — Essai de nomenclature des croûtes s. l. *Bull. Soc. Sc. nat. Tunisie*, t. 2, p. 141-142.
- (1951). — Étude géologique, hydrogéologique et pédologique des croûtes en Algérie. Thèse d'Ing.-Dr. *Dir. Serv. Colon. et Hydr.*, sér. *Ét. scient.*, Pédologie n° 1, Alger.
- EKMAN Sven (1935). — *Tiergeographie des Meeres*. Leipzig.
- FALKE H. (1950). — Das Fischsterben in der Bucht von Concepcion. *Senckenb.*, Bd 31, p. 52-77.
- FLANDRIN J., GAUTIER M. et LAFFITTE R. (1948). — Sur la formation de la croûte calcaire superficielle en Algérie. *C. R. Ac. Sc.*, t. 226, p. 416-418.
- FOURMARIER P. (1922). — Observations géologiques aux Djebels Slata et Hameima (Tunisie centrale). *Ann. Soc. géol. Belgique*, t. 45, p. M 3-34.
- FRANCIS-BŒUF Cl. (1947). — Sur la teneur en oxygène dissous du milieu intérieur des vases fluvio-marines. *C. R. Ac. Sc.*, t. 225, p. 392-394.

- GANOSSIS (1931). — Influence des sels sur la perméabilité du sol. *Ann. Sc. agron.*, n° 5, p. 686.
- GAUCHER G. (1947). — Les sols rubéfiés et les sols à croûte du Bas-Chelif et des basses plaines oranaises. *C. R. Ac. Sc.*, t. 225, p. 250-252.
- (1948). — Sur quelques conditions de formation des croûtes calcaires. *Ibid.*, t. 227, p. 215-217.
- GAUTIER M. (1947). — Le problème hydraulique du Chott ech Chergui. Données générales succinctes. Alger.
- GEMAEHLING Cl. et PACQUANT J. (1951). — La plaine de l'Habra. *Terres et Eaux*, n° 12, Alger.
- GESSNER H. (1936). — L'analyse mécanique (traduit de l'allemand par J. Ph. BUFFLE). Paris.
- GIGNOUX M. (1913). — Les formations marines pliocènes et quaternaires de l'Italie du Sud et de la Sicile. Thèse. *Ann. Univ. Lyon*, nouv. sér., Sc. et Méd., fasc. 36.
- GIGOUT M. (1948 a). — Sur l'âge de la croûte au Maroc oriental. *C. R. somm. S. G. F.*, p. 136-137.
- (1948 b). — Les golfes quaternaires de Mazagan (Maroc occidental). *C. R. Ac. Sc.*, t. 226, p. 1101-1102.
- (1949). — Définition d'un étage Ouljien. *Ibid.*, t. 229, p. 551-552.
- (1952). — Critique de la théorie de la flexure continentale. *C. R. 19^e sess. Congr. géol. intern. Alger*, sect. XIII, fasc. XIV, p. 45-56.
- GILLET S. (1929). — Variations des Cardiidés dans le bassin dacique. *Mélanges*. Publ. Inst. fr. Hautes Études en Roumanie, III, sér. scient.
- GLANGEAUD L. (1933). — Unités paléogéographiques et structurales de l'Atlas méditerranéen (Algérie, Maroc Tunisie). *Actes Soc. linnéenne Bordeaux*, t. 35.
- (1938). — Transport et sédimentation dans l'estuaire et à l'embouchure de la Gironde. Caractères pétrographiques des formations fluviales, saumâtres, littorales et néritiques. *B. S. G. F.*, (5), VIII, p. 599-630.
- (1952). — Histoire géologique de la province d'Alger. *19^e Congr. géol. intern. Alger, Monogr. région.*, sér. 1, n° 25.
- GOBERT E. G. (1948). — Sur le problème des croûtes et des sols capsians. *Bull. Soc. Sc. nat. Tunisie*, t. 1, p. 56-65.
- GOLDSCHMIDT V. M. (1945). — The geo-chemical « background » of minor-element distribution. *Soil. Sc.*, vol. 60, p. 1-7.
- GOLOBOV Y. K. (1948). — Limite supérieure de la zone à SH₂ dans la partie orientale de la mer Noire. *Dokl. Ak. Nauk SSSR*, vol. LXIII, n° 2 (en russe, trad. R. FRIDMAN).
- GOTTIS Ch. (1953). — Stratigraphie et tectonique du « flysch » numidien en Tunisie septentrionale. *C. R. Ac. Sc.*, t. 236, p. 1059-1061.
- GOURINARD Y. (1952). — Le littoral oranais (mouvements verticaux et anomalies gravimétriques). *19^e Congr. géol. intern. Alger, Monogr. région.*, sér. 1, n° 22.
- GRUET E. (1951). — Silex moustériens récoltés au cap Blanc dans la plage tyrrhénienne. *70^e Congr. A. F. A. S.*, Tunis, vol. III, p. 143.
- GSELL St. (1918). — Histoire ancienne de l'Afrique du Nord (2^e éd., 1921 ; 3^e éd., 1925). Paris, Hachette.
- HAZEN HALLEN (1892). — Experiments up on the purification of sewage and water at the Lawrence experiment station. *Mass. State Board Health, 23^e Ann. Rep.*, p. 429-431.
- (1893). — Some physical properties of sands and gravels, with special reference to their use in filtration. *Ibid.*, 24^e Ann. Rep., p. 550.
- HELDT H., RIVIÈRE A. et BELLAIR P. (1947). — Origines possibles des bones-beds. *C. R. Ac. Sc.*, t. 225, p. 882-883.
- HELDT J. H. (1948). — Sur la prétendue présence de *Mercierella enigmatica* FAUVEL, Serpulien d'eau saumâtre dans les bassins de la ville de Tunis. *Bull. Soc. Sc. nat. Tunisie*, t. 1, p. 91-94.
- (1952). — Eaux rouges. *Ibid.*, t. 5, p. 103-108.
- HERON DE VILLEFOSSE (1906). — *C. R. Ac. Inscr. et Belles-Let.*, p. 118-121. Et *Corpus*, t. 8, supp. n° 24512.
- HESSE R., ALLE W. C. et SCHMIDT K. P. (1937). — Ecological animal geography. New York, J. Willy and Sons. Londres, Chapman a. Hall.
- HILL R. A. (1940). — Geochemical patterns in Coachella Valley. *Trans. amer. geophys. Union.*, p. 1, p. 46-49.
- (1942). — Salts in irrigation water. *Trans. amer. Soc. civ. Eng.*, vol. 107, p. 1478-1493.
- HINDERMEYER J. (1953). — Les appareils phonolitiques du Sarho. *C. R. Ac. Sc.*, t. 237, p. 1542-1544.
- HOFMAN B. J. (1952). — The gravity field of the West-Mediterranean Area. *Geol. en Mijnb.*, n° 8, p. 297-306.
- HUZAYYN S. A. (1941). — The place of Egypt in prehistory, a correlated study of climates and cultures in the old world. *Mém. Inst. Egypte*, t. 43.

- IASTREBOV E. V. (1952). — Traces de tectonique quaternaire dans l'Oural du Nord. *Bull. Comm. Et. quaternaire*, n° 16, p. 64-68 (en russe, trad. S. KETCHIAN).
- IERMOLAÏEV M. M. (1948). — Sur la lithogénèse des sédiments marins argileux plastiques. *Izv. Ak. Nauk SSSR (Géol.)*, n° 1, p. 120 (en russe, trad. R. FRIDMAN).
- IRMAÏ S. (1947). — Sur le mouvement des eaux dans le sol. *Rev. univ. Mines*, t. 90, p. 129-139, Liège.
- IRMAÏ S. et BASANOV J. (1942). — L'infiltration de l'eau dans les sols légers et lourds et sa détermination expérimentale. Haïfa (en hébreu).
- JEFFREYS J. G. (1878-1881). — On the Mollusca procured during the « Lightning » and « Porcupine » expeditions, 1866-1870. *Proc. Sc. Meet. zool. Soc., London*, 1 (1878), p. 393 ; 2 (1879), p. 553 ; 3 (1881), p. 693 ; 4 (1881), p. 922.
- JOVE P. (1574). — *Pauli Jovii Novocomensis, episcopi Nucerini, ex Historiarum sui temporis*, l. XXXIII. Extr. de Sim. SCHARD, *Rerum Germanicorum scriptores*, t. 2, in-4°. Bâle. In AUDOLLENT [1901], app. II.
- KARPEVICH A. (1946). — Réponses de certaines espèces de la famille des Cardiidés à la salinité dans le Nord de la mer Caspienne. *Dokl. Ak. Nauk SSSR*, vol. LIV, p. 73-76 (en russe).
- KARPOFF R. (1952). — Quelques exemples de tectonique récente dans le Bas-Sahara. *C. R. somm. S. G. F.*, p. 245-247.
- KATZ K. (1928). — Analizy solaneh wglebnych i wod rzecznych regionu Boryslawskiego (Analyses des eaux profondes de la région de Boryslav). *Bull. Serv. géol. Karpates*, n° 17.
- KEGEL W. (1952). — Über die Einbettung doppelklappiger Muschel-Gehäuse. *Senckenb.*, Bd 33, p. 227-233.
- KELLY (1948). — Cation exchange in soils. New York, MacGraw-Hill.
- KNIFFEN F. B. (1936). — A preliminary report on the indian mounds and middew of Plaquemines and St.-Bernard Parishes. *Louisiana geol. Surv., geol. Bull.*, n° 8, p. 407-422.
- KOFOÏD C. A. (1911). — *Dinoflagellata* of the San Diego region, IV : the genus *Gonyaulax*. *Univ. California Publ., Zool.*, vol. 8, n° 4, p. 187-286.
- KOPECKY L. (1927). — Investigations of the relations of water to soil. *1st intern. Congr. Soil Sc.*, vol. I, p. 495.
- KREGER D. (1940). — On the ecology of *Cardium edule* L. *Arch. Neerl. Zool.*, t. 4, p. 157-200.
- KREJCI K. (1926). — Beobachtung an rumänischen Seichtwasserblagerung. *Senckenb.*, Bd 8, p. 6-15.
- KUFFERATH J. (1951). — Représentation graphique et classification chimique rationnelle en type des eaux naturelles. *Bull. Inst. r. Sc. nat. Belgique*, t. 27, nos 43, 44 et 45.
- LACROUX M. V. (1932). — L'évaporation en Tunisie. *65^e Congr. Soc. Savantes*, p. 525-526.
- (1934). — Nouvelle note sur l'évaporation en Tunisie. *67^e Congr. Soc. savantes*, p. 237-240.
- LAFFITTE R. (1939). — Les plissements postnummulitiques dans l'Atlas saharien. *B. S. G. F.*, (5), IX, p. 135-156.
- (1940). — Considérations climatiques au sujet du Pliocène supérieur (Villafranchien) d'Algérie. *C. R. somm. S. G. F.*, p. 235-237.
- (1942). — Plissements postpliocènes et mouvements quaternaires dans l'Algérie occidentale. *C. R. Ac. Sc.*, t. 215, p. 372-374.
- (1948). — Sur l'étage sahelien Pomel. *Bull. Soc. Hist. nat. Afr. Nord*, t. 39, p. 31-56.
- (1952). — Relations stratigraphiques entre le Miocène et le Pliocène dans le N de la Tunisie. *C. R. somm. S. G. F.*, p. 250-251.
- LAFFITTE R. et DUMON E. (1948). — Plissements pliocènes supérieurs et mouvements quaternaires en Tunisie. *C. R. Ac. Sc.*, t. 227, p. 138-140.
- LAFOND R. (1953). — Sur l'évolution granulométrique des sédiments dans le bassin de la Vilaine. *B. S. G. F.*, (6), III, p. 175-185.
- LAGRULA J. (1951). — Étude gravimétrique de l'Algérie-Tunisie. *Bull. Serv. Carte géol. Algérie*, sér. 4, n° 2.
- LAMAKIN V. V. (1949). — Sur l'étude des mouvements quaternaires de l'écorce terrestre dans la région de la plaine de la Petchora. *Dokl. Ak. Nauk SSSR*, vol. LXII, p. 669-672 (en russe, trad. S. KETCHIAN).
- LAMOTHE M. DE (1905). — Les dépôts pléistocènes à *Strombus bubonius* Lmk de la presqu'île de Monastir. *B. S. G. F.*, (4), V, p. 537-559.
- (1911). — Les anciennes lignes de rivage du Sahel d'Alger. *Mém. Soc. géol. France, Géol.*, 4^e sér., n° 6.
- LANGELIER W. F. et LUDWIG H. F. (1942). — Graphical methods for indicating the mineral character of natural waters. *Journ. amer. Water Works Ass.*, vol. 34, p. 335-352.

- LEES G. M. et FALCON N. L. (1952). — The geographical history of the Mesopotamian plains. *Geogr. Journ. Gr. Brit.*, vol. 118, n° 1.
- LEIGHLY J. B. (1932). — Toward a theory of the morphologic significance of turbulence in the flow of water in streams. *Univ. California Publ., Geogr.*, vol. 6, p. 1-22.
- LE MESLE G. (1888). — Exploration scientifique de la Tunisie. Mission géologique en avril, mai, juin 1887. *Journal de voyage*. Paris.
- LEROY R. (1948). — Les eaux incluses et l'humidité. *Ind. Agr. et Aliment.*, 65^e ann., n° 7, p. 213.
- LOMBARD A. (1953). — Les rythmes sédimentaires et la sédimentation générale. Une synthèse. *Rev. Inst. fr. Pétrole*, vol. 8, n° spécial, p. 9-45.
- LUCAS G. (1948 a). — La sédimentation calcaire. Action du carbonate de sodium sur l'eau de mer. *C. R. Ac. Sc.*, t. 226, p. 937-939.
- (1948 b). — La sédimentation calcaire. Quelques modalités de l'alcalinisation de l'eau de mer en présence d'ions carboniques. *Ibid.*, t. 226, p. 1023-1025.
- MARCHAND J. M. (1928). — The nature of the sea-floor deposits in certain regions on the West-Coast. *Surv. Union South Africa, Fisheries a. marine Biol., sp. Rep.*, n° 5.
- MARGAT J. (1953). — Plissement d'une terrasse quaternaire dans le Haut Atlas (Maroc). *C. R. Ac. Sc.*, t. 237, p. 1731-1732.
- MARION A. F. (1883). — Esquisse d'une topographie zoologique du golfe de Marseille. *Ann. Musée Hist. nat. Marseille*, t. 1.
- (1887). — Faune malacologique de l'étang de Berre. *C. R. Ac. Sc.*, t. 105, p. 71-73.
- MARTIN A. (1950). — Interprétation des analyses d'eau. *C. R. Soc. Sc. nat. Maroc*, p. 122-125.
- MARTONNE E. DE (1948). — Traité de géographie physique (t. 1 : climat, hydrographie) (7^e éd.). Paris, Armand Colin.
- MAUCHA R. (1932). — Hydrochemische Methoden in der Limnologie. *Die Binnengewässer*, Bd 12, p. 87-89, Stuttgart.
- (1946). — Einige Gedanken zur Frage der Nährstoffhaushalts der Gewässer. *Hydrobiologia*, Bd 1, p. 225-237.
- MEINZER O. E. (1919). — Groundwater for irrigation in Lodgepole Valley, Wyoming and Nebraska. *U. S. geol. Survey, Water-Supply Pap.*, n° 425.
- (1923 a). — The occurrence of groundwater in the United States (with a discussion of principles). *Ibid.*, n° 489.
- (1923 b). — Outline of groundwater hydrology with definition. *Ibid.*, n° 494.
- (1927). — Plants as indicators of groundwater. *Ibid.*, n° 577.
- (1942). — Hydrology. New York, Mac Graw-Hill, coll. « Physic of the earth ».
- MELCHER A. F. (1920). — Determination of pore space of oil and gas sands. *Mining a. Metallurgy*, ser. 5, n° 160, p. 2-9.
- MENARD H. W. et BOUCOT A. J. (1951). — Experiments of the movement of shells by water. *Amer. Journ. Sc.*, vol. 249, p. 131-151.
- MERIAUX S. (1952). — Observations sur la méthode densimétrique dans l'analyse granulométrique. *C. R. Ac. Sc.*, t. 235, p. 381.
- MEYER A. (1939). — Sols et fondations. Paris, Armand Colin.
- MILLOT G. (1949). — Relations entre la constitution et la genèse des roches sédimentaires argileuses. Thèse. *Géol. appl. et Prosp. min.*, Nancy, t. II, nos 2-4.
- MINOUX G. et RICOUR J. — (1946). Découverte de fossiles dans la dolomie-moellon du Keuper moyen. *B. S. G. F.*, (5), XVI, p. 445-450.
- MIRTCHINE G. F. (1940). — L'importance des mouvements récents de l'écorce terrestre pour établir la stratigraphie et les conditions de gisements des dépôts quaternaires. Valeur des études paléontologiques. *Bull. Soc. Natur. Moscou (Géol.)*, t. 18, p. 5-10 (en russe, rés. français p. 10, trad. S. KETCHIAN).
- MONCHICOURT Ch. DE (1929). — Documents historiques sur la Tunisie. Paris, Soc. Éd. géogr. marit. et colon.
- MONTANARO G. (1920). — *Paleont. italica*, vol. XXXI.
- MURRAY J. et HJORT J. (1912). — The Dephts of the Ocean. Londres, Mac Millan.
- NANGIS DE. — *Gesta sancti Ludovici* (Recueil des historiens des Gaules et de la France, t. XX, p. 450-452). In AUDOLLENT [1901], app. II.
- OBRUCHEV V. A. (1936). — Jeunesse du relief de la Sibérie. In Recueil pour le cinquantenaire de l'activité scien-

- tifique et pédagogique de V. T. Vernadskii. Moscou, Ed. Ak. Nauk. SSSR, p. 955-975 (en russe, trad. S. KETCHIAN).
- (1948). — Traits fondamentaux de la cinétique et de la plastique de la néotectonique. *Izv. Ak. Nauk. SSSR*, (Géol.), n° 5, p. 13-24 (en russe, trad. S. KETCHIAN).
- OWODENKO B. et HORON O. (1952 a). — Échelle stratigraphique du bassin houiller de Djerada. *C. R. 3^e Congr. Stratigr. Carbonifère*, Heerlen (1951), t. II, p. 487-492.
- (1952 b). — Gisements houillers au Maroc. In « Géologie des gîtes minéraux marocains ». *19^e Congr. géol. intern. Alger, Monogr. région.*, sér. 3, n° 1.
- PALLARY P. (1912). — Sur la faune de l'ancienne lagune de Tunis. *Bull. Soc. Hist. nat. Afr. Nord*, t. 3, p. 215-228.
- (1914). — Liste des Mollusques du golfe de Tunis. *Ibid.*, t. 5, p. 12-27.
- PALMER Ch. (1911). — The geochemical interpretation of waters analysis. *U. S. geol. Survey. Bull.*, n° 479.
- PARDÉ M. (1925). — Le régime du Rhône, étude hydrologique. Thèse. *Inst. Et. rhodaniennes*, t. 1, Lyon.
- PIMIENTA J. (1950). — Les nodules de tuf et la formation actuelle des croûtes calcaires dans les environs de Tunis. *C. R. somm. S. G. F.*, p. 211-212.
- (1951). — Variations chimiques de la composition des eaux souterraines. Principe d'une méthode de représentation cartographique. *70^e Congr. A. F. A. S.*, Tunis, vol. I, p. 111-114.
- (1953 a). — La lagune de Tunis considérée comme un milieu de sédimentation à la fois marin et continental. *C. R. Ac. Sc.*, t. 236, p. 946-948.
- (1953 b). — Un phénomène de néotectonique à l'embouchure de la Medjerda. *Ibid.*, t. 236, p. 1184-1185.
- (1953 c). — Sur les déplacements de l'embouchure de la Medjerda et les caractères de son delta. *Ibid.*, t. 236, p. 2326-2328.
- (1953). — Plissements actuels à l'embouchure de la Medjerda. *Bull. Soc. Sc. nat. Tunisie*, t. 6, p. 161-168.
- (1954 a). — Évolution granulométrique exceptionnelle de vases littorales en présence de matières organiques. *C. R. Ac. Sc.*, t. 238, p. 1248-1250.
- (1954 b). — Les circulations des eaux dans les argiles. *Ibid.*, t. 238, p. 1432-1434.
- PIPER A. M. (1944). — A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *35^e ann. Meet. amer. geophys. Union*, sect. Hydrol., p. 914-923.
- POKRASS E. P. (1952). — Des plus récentes géostructures du Sud de la plaine de la Sibérie occidentale, en rapport avec l'étude de son relief, et manifestation de la tectonique à Bar Ba. *Dokl. Ak. Nauk SSSR*, vol. 84, p. 1041-1044 (en russe, trad. S. KETCHIAN).
- POMEL A. (1884). — Une mission scientifique en Tunisie en 1877. *Bull. Ec. sup. Sc. Alger*, fasc. I.
- (1889). — Description stratigraphique générale de l'Algérie pour servir à l'explication de la 2^e édition de la carte géologique provisoire. *Bull. Serv. Carte géol. Algérie*.
- PORCHET (1923). — Lois de l'écoulement de l'eau à travers les colonnes de sables. Thèse. *Ann. Min. Agr.*, fasc. 53, p. 283-358.
- PRUVOST P. (1930). — Sédimentation et subsidence. Livre jubilé. Soc. géol. France, t. II, p. 545-564.
- REVELLE R. (1941). — Criteria for recognition of sea water in ground waters. *Trans. amer. geophys. Union*, p. 3, p. 595-596.
- RICHTER R. (1922). — Flachseebeobachtung zur Paläontologie und Geologie. *Senckenb.*, Bd 4, p. 103-140.
- RIVIÈRE A. (1940). — L'eau de mer et les sédiments calcaires. *C. R. somm. S. G. F.*, p. 40.
- (1948). — Observations sédimentologiques sur la côte vendéenne. Sédimentation littorale et estuarienne, leurs lois générales. *Rev. gén. Hydraulique*, n° 48, p. 5-28.
- (1949 a). — Sur la formation des rides sous-marines littorales. *C. R. Ac. Sc.*, t. 229, p. 1086-1087.
- (1949 b). — Conditions d'existence et aspect des rides sous-marines littorales. Leur rôle dans la sédimentation côtière. *C. R. somm. S. G. F.*, p. 311-312.
- (1950). — Quelques aspects de l'évolution littorale entre le delta du Var et la région d'Antibes. Causes et mécanismes. Séquences deltaïques. *Rev. gén. Hydraulique*, n° 59.
- (1951). — Sur la sédimentation vaseuse au large des côtes. *C. R. Ac. Sc.*, t. 232, p. 1503-1505.
- (1952 a). — La granulométrie des sédiments argilo-vaseux est susceptible d'une expression analytique générale. *Ibid.*, t. 235, p. 2628-2630.
- (1952 b). — Sur la représentation graphique de la granulométrie des sédiments meubles. *B. S. G. F.*, (6), II, p. 145-154.

- RIVIÈRE A. (1952 c). — Expression analytique générale de la granulométrie des sédiments meubles. *Ibid.*, (6), II, p. 155-167.
- RIVIÈRE A. et DUBOUL-RAZAVET C. (1951). — Sur certains phénomènes d'évolution deltaïque. *C. R. Ac. Sc.*, t. 233, p. 186-188.
- RIVIÈRE A. et MUNIER P. (1948). — Contribution à l'étude des argiles utilisées en céramique, fasc. 2. *Inst. Céramique franç.*, n° 17.
- RIVIÈRE A., PIMIENTA J., RAZAVET C., FRIDMAN R. et VERNHET S. (1952). — Sur l'interprétation granulométrique des sédiments argileux et argilo-vaseux. *C. R. Ac. Sc.*, t. 234, p. 2298-3000.
- RIVIÈRE A. et VERNHET S. (1951). — Sur la sédimentation des minéraux argileux en milieu marin en présence de matières humiques. *Ibid.*, t. 233, p. 807-808.
- ROGERS G. S. (1917). — Chemical relations of the oil field waters in San Joaquin valley, California. *U. S. geol. Survey, Bull.* n° 653,
- (1919). — The Sunset-Midway oil field, California. Part. 2, Geochemical relations of the oil, gas and water. *U. S. geol. Survey, Prof. Paper*, n° 117.
- ROUX H. (1911). — Les plis des environs de Redeyef (Sud tunisien). Contribution à l'étude de l'Atlas saharien. *B. S. G. F.*, (4), XI, p. 249-284.
- RUSSEL J. R. (1936). — Physiography of Lower Mississippi river delta. In « Lower Mississippi river delta ». *Louisiana geol. Surv., geol. Bull.*, n° 8, p. 1-199.
- (1939). — Morphologie des Mississippideltas. *Geogr. Zeitschrift*, 45 Jahrg., H. 8, p. 281-293, Leipzig.
- (1942). — Geomorphology of the Rhône delta. *Ann. Ass. amer. Geogr.*, vol. 32, p. 149-254.
- RUSSEL J. R. et RUSSEL R. D. (1939). — Mississippi river delta sedimentation. Recent marine sediments. *Bull. amer. Ass. Petr. Geol.*, p. 153-177.
- SCHOELLER H. (1934 a). — Sur la concentration des sels dissous dans les eaux souterraines. *Comm. Ét. Eaux souterr.*, Congr. d'Erfoud, p. 46, Rabat.
- (1934 b). — Les échanges de bases dans les eaux souterraines vadoses. Trois exemples en Tunisie. *B. S. G. F.*, (5), IV, p. 389-420.
- (1935). — Utilité de la notion des échanges de bases pour la comparaison des eaux souterraines vadoses. *Ibid.*, (5), V, p. 651-657.
- (1939). — Le Quaternaire du golfe ancien de Grombalia. *Actes Soc. linn. Bordeaux*, t. XCI, p. 14.
- (1944). — Sur la croûte calcaire dans les Pouilles. *C. R. somm. S. G. F.*, p. 181-183.
- SCHOELLER H. et GOSSELIN M. (1939). — Notice de la carte hydrogéologique au 50 000^e de la Tunisie. Bordeaux.
- SCHOFIELD R. K. (1935). — 3rd intern. Congr. Soil. Sc., vol. 2, p. 38-48.
- SHEPARD F. P. (1928). — Significance of submerged deltas in the interpretation of continental shelves. *Bull. geol. Soc. Amer.*, vol. 39, p. 1157-1170.
- SOLIGNAC M. (1927). — Étude géologique de la Tunisie septentrionale. Thèse. Tunis, J. Barlier.
- (1947). — Description d'une nouvelle carte géologique de la Tunisie à l'échelle du 500 000^e (2^e éd.). Tunis.
- SOLIGNAC M. et DEPÉRET Ch. (1931). — Sur le Sahelien de la Tunisie septentrionale. *C. R. Ac. Sc.*, t. 172, p. 1557-1560.
- SONDER R. A. (1946). — Profondeur marine et faciès lithologique. *Ecl. geol. Helv.*; vol. 39, n° 2, p. 260-263.
- STABLER H. (1911). — The industrial application of water analysis. *U. S. geol. Surv., Water-Supply Pap.*, n° 274.
- STCHEPINSKY V. (1938). — Contribution à l'étude du Sahelien de Tunisie. *Mém. Soc. géol. France*, nouv. sér., t. XVI, n° 37.
- (1952). — Défense du Sahelien tunisien. *C. R. somm. S. G. F.*, p. 70-71.
- TALTASSE P. (1950). — Recherches géologiques et hydrologiques dans le bassin lacustre de Fès-Meknès. Thèse. Rabat.
- TEILHARD DE CHARDIN P. (1938). — Le Villafranchien d'Asie et la question du Villafranchien. *C. R. somm. S. G. F.*, p. 325-327.
- (1946). — Remarques sur les flexures continentales de Chine. *B. S. G. F.*, (5), XVI, p. 497-502.
- THORNTHWAITTE C. W. (1946). — The moisture factor in climate. *Trans. amer. geophys. Union*, p. 41-48.
- (1948). — An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, vol. 38, p. 55-94.
- TICKELL E. G. (1921). — A method for the graphical interpretation of water analysis. *Rep. California St. Oil a. Gas Superv.*, vol. 6.

- TISSOT Ch. (1884-1888). — Géographie comparée de la province romaine d'Afrique (3 vol.). Paris, Imprimerie nationale.
- TOLMAN C. F. (1947). — Ground-water. New York, Mac Graw-Hill, coll. « Physic of the Earth ».
- TWENHOFEL W. H. (1939). — Principles of sedimentation. New York, Mac Graw-Hill.
- UMBROVE J. H. F. (1950). — Bewegigen van bodem en zeeniveau in ons kustgebied gedurende de laatste 4 000 jaren. *Nederl. Kruidk. Arch.*, vol. 57, p. 124-126.
- VAUFREY R. (1932). — Les plissements acheuléo-moustériens des alluvions de Gafsa. *Rev. Géogr. phys. et Géol. dyn.*, vol. 5, p. 299-322.
- VELLINGER E. et MONICARD R. (1950). — Étude du détecteur d'hydrocarbures à pont de Wheatstone. *Rev. Inst. fr. Pétrole et Ann. Comb. liq.*, vol. 5, n° 9, p. 271-285.
- VERNHET S. (1953). — Sur un mode de cheminement littoral par migrations lentes de rides obliques ou perpendiculaires. *C. R. Ac. Sc.*, t. 237, p. 1268-1270.
- VIBERT A. (1949). — Le mouvement de l'eau dans le sol. Nouvelles considérations sur le débit d'une nappe libre s'écoulant dans un puits ou dans un drain. Le paradoxe de Dupuit et Hamel. *Le Génie civil* (1^{er} mai).
- WALTHER J. (1893-1894). — Einleitung in die Geologie als historische Wissenschaft. Iena.
- WASHBURN E. W. et BUNTIG E. N. (1922). — Determination of porosity by the method of gas expansion. *Amer. ceramic. Soc. Journ.*, vol. 5, p. 113-129.
- WASMUND E. (1926). — Biocoenose und thanatocoenose. *Arch. hydrobiol.*, t. 17, p. 1-117.
- WELSCH J. (1919). — L'argile à Scrobiculaires des marais maritimes du centre ouest de la France. *B. S. G. F.*, (4), XIX, p. 46-61.
-

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
AVANT-PROPOS.	5
INTRODUCTION.	
I. Les bassins paraliques de la région de Tunis.....	7
II. L'environnement climatique des phénomènes de sédimentation.....	12
CHAPITRE PREMIER : UNITÉ CYCLOTHÉMATIQUE UTIQUIENNE.	
I. Hydrographie de la Medjerda.....	20
II. Évolution littorale actuelle du delta..	23
Actions maritimes.....	24
Morphologie côtière et sous-marine.....	26
Dérivations périlittorales.....	30
Aspect d'ensemble.....	34
III. Évolution géologique du delta.....	34
Évolution historique.....	35
Les cycles.....	40
Subsidence cyclothématique.....	46
CHAPITRE II : UNITÉ MANOUBIENNE.	
I. Principes préliminaires d'hydrogéologie et rôle aquifère des argiles.....	49
Hydrologie des argiles.....	49
Caractéristiques chimiques des eaux souterraines.....	55
Procédé de représentation : diagramme hexagonal logarithmique.....	57
II. Un exemple de water-table endoréique à la Manouba-Sedjoumi.....	59
III. Drainage des argiles dans la zone de saturation de la Manouba....	63
Les sondages.....	64
Lithologie.....	71
Variations chimiques et déplacement des eaux au sein de la zone de saturation.....	72
Principe d'une exploitation hydraulique par sondage.....	77
IV. Aspect général de la sédimentation fluviatile manoubienne.....	80
Les croûtes calcaires.....	80
La sédimentation détritique de la Medjerda.....	83

CHAPITRE III : LA LAGUNE DE TUNIS.

I. Un exemple de milieu lagunaire.....	85
II. Sédimentation authigène organique et minérale dans la lagune de Tunis.....	91
Description systématique de la faune sédimentée.....	91
Techniques d'étude de la sédimentation minérale.....	92
Sédimentation calcaire.....	96
Dépôt des matières organiques.....	98
Magnésie et sédimentation dolomitique.....	99
Sédimentation phosphatée.....	101
Sédimentation du fer.....	101
III. Étude granulométrique.....	104
Méthodes.....	104
Observations à partir des courbes cumulatives.....	105
Indices granulométriques de A. Rivière.....	107
Variations granulométriques en fonction de la distance au rivage. — Éta-	
blissement d'un nouveau procédé de représentation.....	108
Aspect granulométrique de l'évolution littorale.....	109
Conclusion.....	111
IV. La diagénèse continentale des faciès lagunaires.....	111
Water-table de l'isthme de l'Ariana.....	111
Sondages des environs de Tunis.....	115
Transport des sels dissous et peroxydation des matières organiques et du fer	
réduit dans la zone de saturation.....	119
Faciès marins et continentaux.....	121
Passages latéraux aux faciès gypseux.....	122
Aspect de l'estuaire de la période manoubienne.....	123

CHAPITRE IV : LE DELTA DE LA MEDJERDA AU PLIOCÈNE.

I. Les faciès du Pliocène marin.....	125
Description lithologique.....	126
Contribution de la paléocéologie à la détermination de la lithogénèse.....	129
II. Pliocène lagunaire de Gammart.....	137
III. Pliocène fluviatile.....	139
IV. Paléogéographie du delta.....	140

CHAPITRE V : TECTONIQUE QUATERNAIRE. DÉFINITION D'UNE SÉDIMENTATION SYNORO-
GÉNIQUE.

Plissements quaternaires.....	143
Continuité de l'orogénie plioquaternaire régionale.....	149
Subsidence.....	151
Sédimentation synorogénique et discordances apparentes.....	154
Incidences sur le relief, comparaison avec la néotectonique de Russie et d'Asie	156
Le plissement considéré comme un fait géographique.....	156
Sismicité.....	157
Hypothèse du décollement de l'Atlas tunisien.....	157

RÉSULTATS GÉNÉRAUX.

Position stratigraphique de la série étudiée.....	159
Méthodes et faits nouveaux.....	160
BIBLIOGRAPHIE.....	163
TABLES DES MATIÈRES.....	173

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

STRATIGRAPHIE ET TECTONIQUE
DE L'ÉTAT DE SANTA-CATARINA (BRÉSIL MÉRIDIONAL)

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 12 juin 1955,

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

J. PÉRÈS.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

J. SARRAILH.



MÉMOIRE N° 85

PLANCHE I

Embouchure de la Medjerda d'après un montage de photos aériennes.

(Clichés de l'Institut géographique national, campagne de 1948-1949.)

MÉMOIRE N° 85

PLANCHE II

Cordon littoral fermant la lagune de Porto Farina.

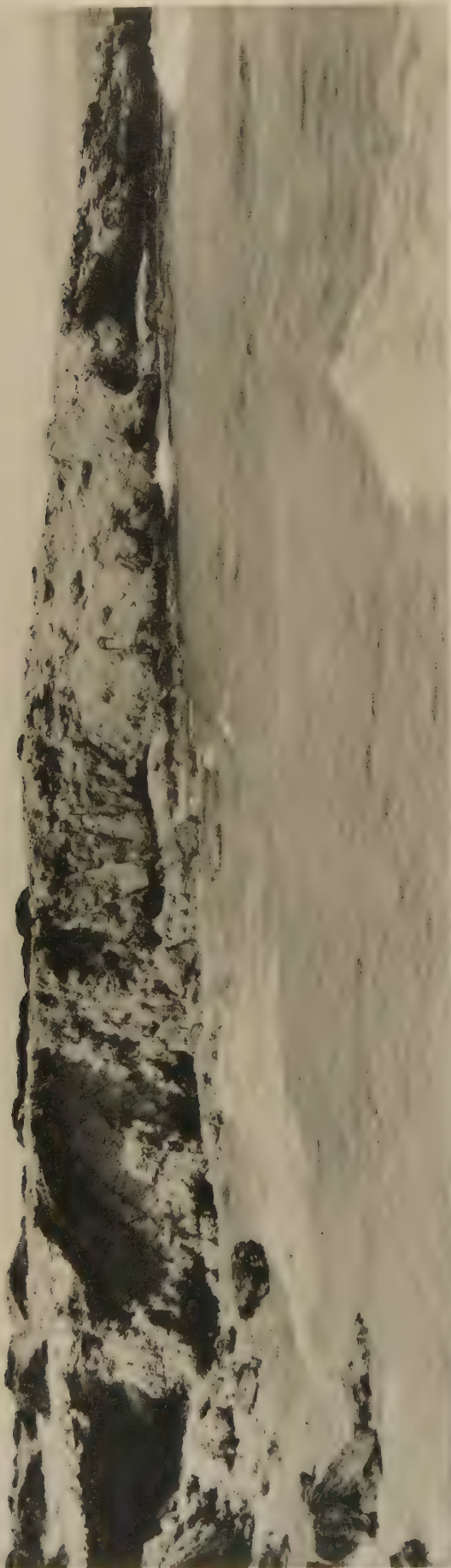
Remarquer les vases noires à l'intérieur de la lagune et les sables clairs à l'extérieur, avec les rides sous-marines allongées dans le haut de la photo (figures de transport) et épaissies dans le bas (figures d'accumulation).

On distingue les jardins sur le cordon littoral, ainsi que le tracé des digues et bordigues de la pêcherie et le chenal serpentant entre les sables.

Repère : bâtiments de la pêcherie dans le cercle.

(Clichés de l'Institut géographique national, campagne de 1948-1949.)





3



2

MÉMOIRE N° 85

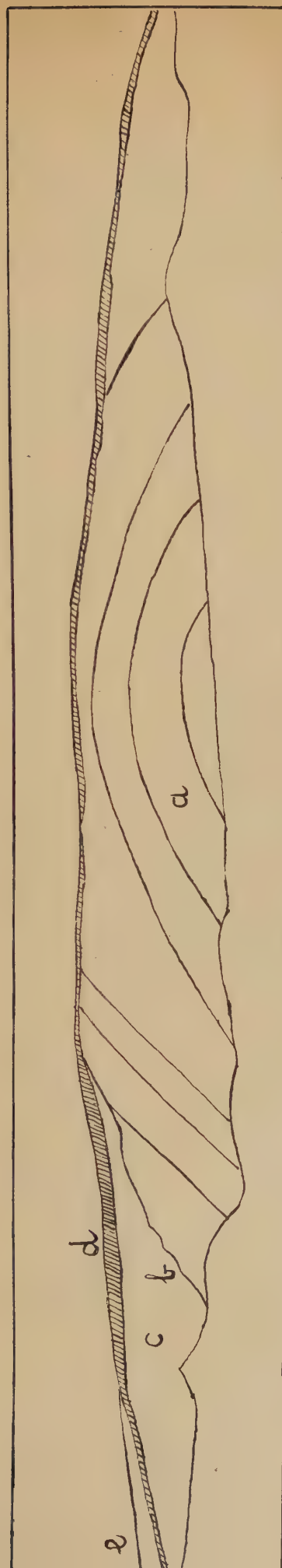
PLANCHE III

FIG. 1. — Anticlinal du Rmel.

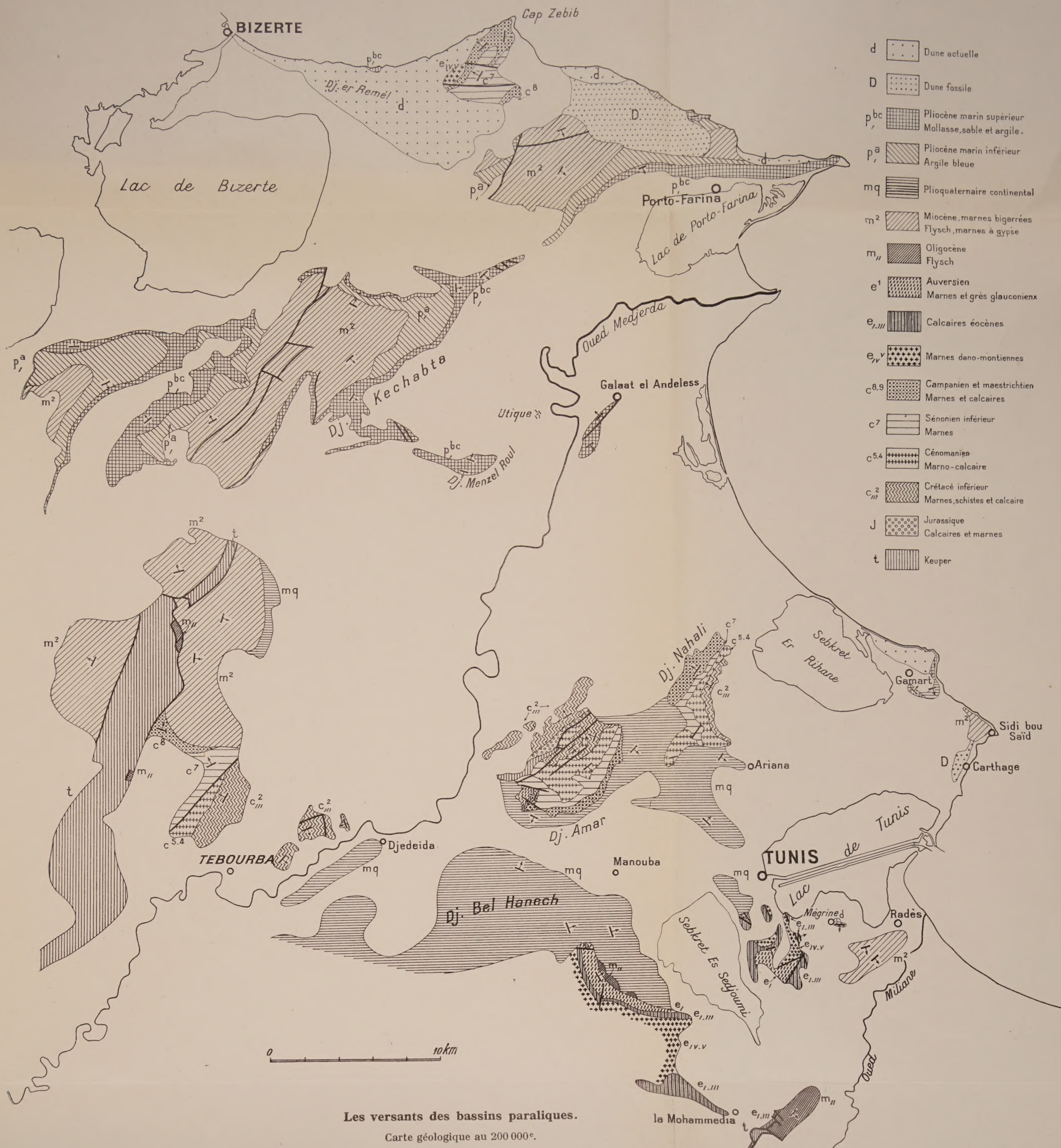
a : Pliocène ; *b* : surface d'érosion, mur du Tyrrhénien transgressif ; *c* : Tyrrhénien avec galets roulés arrachés au Pliocène ; *d* : terrasse tyrrhénienne ; *e* (en dehors des limites de la photo) : dune consolidée.

FIG. 2. — Pliocène du Rmel. Valves de Pectinidés transportées près d'une plage, disposées dans le plan de stratification et indifféremment dans le sens dorsal ou ventral.

FIG. 3. — Terrasse tyrrhénienne du Rmel.



Anticlinal du Rmel.



Les versants des bassins paraliques.
Carte géologique au 200 000^e.

